

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM SOUČinitele TŘENÍ KLOUBNÍ CHRUPAVKY

EXPERIMENTAL STUDY OF FRICTION IN ARTICULAR CARTILAGE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Praus

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Rebenda

BRNO 2017



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Tomáš Praus**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. David Rebenda**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Experimentální studium součinitele tření kloubní chrupavky**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Tribologické procesy probíhající v synoviálních kloubech a složení synoviální kapaliny zásadně ovlivňují funkčnost a životnost kloubních chrupavek. Třecí vlastnosti chrupavky v závislosti na kinematických a zátěžných podmínkách nebyly doposud v literatuře dostatečně popsány. Stejně tak neexistuje jednoznačný postup přípravy a uchování vzorků kloubní chrupavky pro laboratorní analýzy.

Typ práce: výzkumná

#### **Cíle bakalářské práce:**

Cílem práce je experimentální studium tření kloubní chrupavky. Pomocí experimentálního zařízení bude popsán vliv kinematických podmínek a zatížení na součinitel tření v kontaktu kloubní chrupavky a kovového/keramického disku.

Dílčí cíle bakalářské práce:

návrh metodiky přípravy a uchovávání vzorků chrupavek,  
konstrukce přípravku pro upnutí vzorku chrupavky do zařízení MTM,  
volba kinematických a zátěžných podmínek s ohledem na podmínky v reálných kloubech, experimentální analýza vlivu kinematických podmínek a zatížení na součinitel tření.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15–20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

KATTA, Jayanth, Zhongmin JIN, Eileen INGHAM a John FISHER. Biotribology of articular cartilage—A review of the recent advances. Medical Engineering. 2008, 30(10), 1349-1363. DOI: 10.1016/j.medengphy.2008.09.004. ISSN 13504533.

LEES, Deborah, Paul PARTINGTON, Eileen INGHAM a John FISHER. Articular cartilage. Orthopaedics and Trauma. 2016, 30(3), 265-272. DOI: 10.1016/j.mporth.2016.04.007. ISSN 18771327.

SHI, Liu, Vassilios I. SIKAVITSAS, Alberto STRIOLO a John FISHER. Experimental Friction Coefficients for Bovine Cartilage Measured with a Pin-on-Disk Tribometer: Testing Configuration and Lubricant Effects. Annals of Biomedical Engineering. 2011, 39(1), 132-146. DOI: 10.1007/s10439-01-0167-3. ISSN 0090-6964.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

Vedoucí bakalářské práce: Ing. David Rebenda

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 2.11. 2016

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá výzkumem součinitele tření kloubní chrupavky. Po úvodu do biotribologie je v práci popsán princip měření na zařízení Mini-Traction Machine a jeho stručný popis. Dále následuje návrh přípravy a uchovávání vzorků chrupavky, konstrukce upínáku vzorku do zařízení MTM a samotný výzkum součinitele tření. Výsledky experimentálního výzkumu ukázaly negativní vliv uchovávání vzorků v lednici. Naopak měření součinitele tření vzorků uchovávaných v mrazničce prokázalo zachování mechanických vlastností chrupavky. Znatelný vliv na tření má také rychlost a zatěžující síla. S rostoucí rychlostí součinitel tření roste. Při vyšších rychlostech dochází k extrémnímu nárůstu součinitele. Naopak s rostoucí normálovou silou součinitel tření klesá.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Biotribologie, tření, kloubní chrupavka, Mini-Traction Machine

## **ABSTRACT**

This thesis deals with the experimental study of friction in articular cartilage. After the introduction to biotribology, there are described a principle of measurment on the Mini-Traction Machine and a brief description of machine itself. After that, there is a propose for a preparation and storage of cartilage samples, construction of the adapter into the MTM and research of the friction coefficient. The results of experimental research showed the negative effect of storing the samples in the refrigerator. On the other hand, the measurement of the friction coefficient of the samples stored in the freezer showed the preservation of the mechanical properties of cartilage. Even load and speed of loading have a big effect on friction. When the speed increases, the coefficient of the friction increases too. There is an extreme increase of the friction at higher speeds. But with increasing load the friction coefficient decreases.

## **KEYWORDS**

Biotribology, friction, articular cartilage, Mini-Traction Machine

---



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

PRAUS, T. *Experimentální studium součinitele tření kloubní chrupavky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Rebenda.

---





---

## PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Davidu Rebendovi za jeho odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly při vypracování této bakalářské práce. Rovněž bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za pomoc a podporu během celého studia.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci Experimentální výzkum součinitele tření kloubní chrupavky, jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Davida Rebendy a uvedl v seznamu všechny literární, odborné a jiné zdroje.

V Brně dne: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Tomáš Praus

---



**OBSAH**

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>12</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>	<b>13</b>
2.1 Kloubní chrupavka .....	13
2.1.1 Zóna I.....	13
2.1.2 Zóna II .....	14
2.1.3 Zóna III.....	14
2.1.4 Tidemark.....	14
2.1.5 Zóna IV.....	14
2.2. Synoviální tekutina .....	15
2.3 Účinky zmrazení a rozmrazení chrupavky na její mechanické vlastnosti.....	15
2.4 Měření koeficientu tření hovězí chrupavky na tribometru .....	16
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE .....</b>	<b>23</b>
3.1 Analýza problému.....	24
3.2 Cíle bakalářské práce.....	24
<b>4 MATERIÁL A METODY .....</b>	<b>25</b>
4.1 Mini-Traction Machine.....	25
4.1.1 Princip zařízení .....	25
4.2 Příprava vzorku .....	26
4.3 Vývoj adaptéru na upnutí vzorku v MTM.....	26
4.4 Přehled provedených experimentů .....	28
4.5 Postup měření .....	28
<b>5 VÝSLEDKY .....</b>	<b>29</b>
5.1 Vliv uchovávání vzorku (E1) .....	29
5.2 Opakovatelnost součinitele tření jednoho vzorku (E2) .....	30
5.3 Opakovatelnost součinitele tření různých vzorků (E3) .....	31
5.4 Vliv kinematických podmínek (E4) .....	32
5.5 Vliv zátěžných podmínek (E5) .....	33
<b>6 DISKUZE .....</b>	<b>34</b>
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>36</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>37</b>
<b>9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>	<b>39</b>
<b>10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....</b>	<b>40</b>
<b>11 SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>41</b>
<b>12 SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>42</b>
PŘÍLOHA 1 .....	43
PŘÍLOHA 2 .....	45
PŘÍLOHA 3 .....	47

---

## 1 ÚVOD

Kloubní chrupavka má unikátní strukturu a funkci pro lidské tělo. Klouby a kloubní chrupavka jsou jednou z nejvytíženějších částí lidského těla. Je důležitá jak u vývoje kostí před narozením, tak i pro jejich následný růst.

V současné době se v České republice ročně provede zhruba deset tisíc implantací náhradního kyčelního kloubu. Počet pacientů určených k implantaci kloubní endoprotézy neustále stoupá, a to především kvůli stárnutí populace, náročným sportovním aktivitám, nadváze, vrozeným onemocněním apod. [1]

Při neúnosném opotřebením nebo poškození kloubní chrupavky se přistupuje k výměně kloubu za kloubní náhradu tzv. endoprotézu (TEP). Implantace umělého kyčelního kloubu vede ke zlepšení kvality života a snížení bolestí. Životnost dnešních endoprotéz je přibližně (15 až 20 let), ta se může znatelně zkrátit aktivním stylem života až na polovinu. Díky nevýhodám jako jsou omezená životnost, záněty nebo aseptické uvolnění je snaha tyto implantace oddálit nebo prodloužit jejich životnost. [1, 2]

Tato práce se bude primárně zabývat experimentálním výzkumem tření mezi kloubní chrupavkou a kloubní náhradou. Výzkum je prováděn, aby se objasnil způsob mazání, tření a opotřebením. Výsledek by měl vést k pochopení funkčnosti kloubů, vývoji léků a léčebných metod pro léčbu např. artrózy nebo chondropatie nebo vývoji materiálů pro náhrady chrupavek.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

**2**

---

### 2.1 Kloubní chrupavka

2.1

---

V těle se nachází několik typů chrupavek. Všechny se skládají ze dvou základních částí, extracelulární matrice a buněk. Liší se pouze poměry těchto dvou komponent. Existuje 5 základních typů chrupavky: hyalinní (klouby), fibroelastická (meniskus), vazivová (spoj kostí a vazů nebo šlach), elastická (hrtan, průdušnice) a physeální (růst kostí). Mezi její hlavní vlastnosti se řadí tuhost, pružnost, velmi dobrá odolnost proti opotřebení a absence nervového zakončení. [3]

Zdravá lidská hyalinní chrupavka má hladký, skelný vzhled modro-bílé barvy. Obsahuje takzvanou bifázi (tzn. tekutou i pevnou fázi), která zajišťuje chrupavce její mechanické vlastnosti. Pevná fáze se skládá z extracelulární matrice a chondrocytů. Matrice obsahuje proteoglykany, kolagenní vlákna a nekolagenní proteiny. Tekutá fáze vyplňuje mezery v pevné matici a skládá se z elektrolytů a z vody, která tvoří 65–80 % hmotnosti chrupavky. [3]

Chondrocyty tvoří buněčnou složku a vytvářejí extracelulární matici. Proteoglykany představují přibližně 10–15 % struktury chrupavky. Tyto molekuly na bázi proteinů jsou nejvíce koncentrované ve střední vrstvě a méně koncentrované v hlubších vrstvách. Jednou z jejich funkcí je na sebe vázat vodu, která se nejvíce koncentruje blízko povrchu. Tím se zlepšuje pevnost v tlaku chrupavky. Stárnutím chrupavky se snižuje množství obsažené vody, což má za následek zvýšenou propustnost, sníženou schopnost přenášet sílu a snížený Youngův modul pružnosti. [3]

Kloubní chrupavka se skládá ze čtyř zón a vrstvy zvané tidemark. Zóny jsou charakterizovány různým množstvím a tvarem chondrocytů, orientací vláken či množstvím proteinů. [3, 4]

Pokud dojde k narušení struktury kloubní chrupavky, může se snížit její tlumící schopnost proti rázu nebo zvýšit její součinitel tření. Jedno z onemocnění se nazývá osteoartróza. Tato nemoc je způsobena snížením nebo úplným vymizením kloubní chrupavky, což má za následek nadměrné tření mezi samotnými kostmi. Klouby se stávají tuhými, oteklými, bolestivými až deformovanými.

Obnova chrupavky je velmi dlouhý a náročný proces. Kvůli nedostatku krve je regenerace pomalá. Poranění, které proniká hluboko do vrstvy zvané tidemark, je schopno se léčit prostřednictvím hematomů, endotelového růstu a migraci mezenchymálních buněk dřeně. Propustnost subchondrální vrstvy umožňuje přesun kmenových buněk dřeně, které produkují kolagen a následně vzniká vazivová chrupavka. Ta ovšem nemá tak dobré vlastnosti jako původní chrupavka. Více se opotřebovává, je omezeně pružná, má zvýšenou tuhost a nezpomaluje průběh osteoartrózy. [3]

#### 2.1.1 Zóna I

2.1.1

---

Zóna I, neboli povrchová vrstva, se vyznačuje zploštělými chondrocyty. Kolagenní vlákna jsou rovnoběžná s povrchem subchondrální kosti. Rovnoběžnost zajišťuje odolnost proti smykovému napětí. Proteoglykany jsou v této vrstvě v nejmenší koncentraci. Je nejtenčí ze všech vrstev. Může fungovat jako vrstva regulující molekulární pohyb. [3]

### 2.1.2 Zóna II

Tato vrstva se nazývá přechodná. Její chondrocyty jsou kulovitěho tvaru, kolagenní vlákna jsou šikmá a náhodně uspořádaná. Proteoglykany mají větší koncentraci než v povrchové vrstvě. Je nejsilnější a umožňuje změnu odolnosti proti smykovému napětí na odolnost proti tlakovému napětí. [3]

### 2.1.3 Zóna III

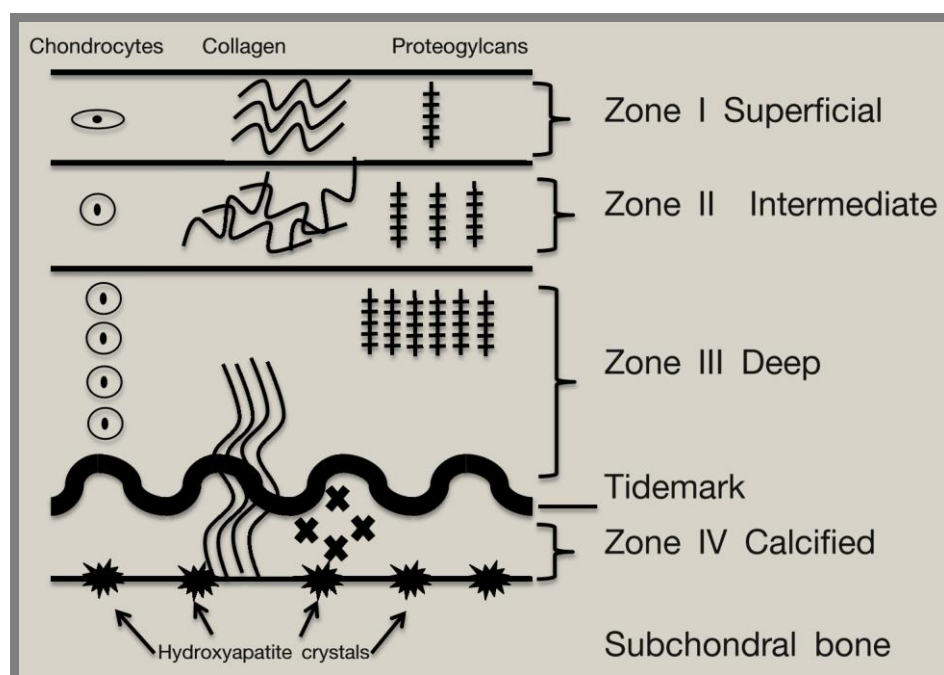
Hluboká nebo také radiální vrstva. Kruhové chondrocyty jsou uspořádány do sloupců. Kolagenní vlákna, která jsou upevněná ke kosti, směřují kolmo na kloub. Proteoglykany zde dosahují největší koncentrace. Ze všech zón je také nejvíce odolná proti tlakovému napětí. [3]

### 2.1.4 Tidemark

Vrstva oddělující pravou chrupavku od pozůstatků růstu kloubní chrupavky v dětství. Rozděluje povrchové nekalcifikované vrstvy od hlubších kalcifikovaných. Nachází se pouze v kloubech a je zcela bez buněk. [3]

### 2.1.5 Zóna IV

Vrstva obsahující kolagen X. Kolagenní vlákna jsou k subchondrální kosti připevněny krystaly hydroxyapatitu. [3]



**Obr. 2-1** Struktura kloubní chrupavky. Povrchová vrstva (ZONE I), přechodná (ZONE II), radiální (ZONE III), TIDEMARK, kalcifikovaná vrstva (ZONE IV), subchondrální kost (SUBCHONDRAL BONE).

## 2.2. Synoviální tekutina

2.2

---

Dalším ovlivňujícím faktorem vyskytujícím se v chrupavkách je synoviální tekutina. Jedná se v podstatě o přefiltrovanou krevní plasmu. Je to vysoce viskózní, čirá, nažloutlá tekutina vyloučená z fibroblastů. Obsahuje zejména vodu, kyselinu hyaluronovou, proteiny (albumin,  $\gamma$ -globulin), fosfolipidy a glykoprotein lubricin. Množství jednotlivých složek se u různých typů chrupavek liší. [3, 5]

Synoviální kapalina má dvě hlavní funkce. První z nich je přenos nutričních látek jako je glukóza do kloubní chrupavky a druhou je napomáhat pohybu kloubu mazáním kloubních ploch. [6]

U testů se synoviální tekutina nahrazuje například 25 % roztokem hovězího séra. Roztok má z hlediska obsahu proteinů nebo nenewtonského chování kapaliny podobné vlastnosti jako synoviální tekutina. Míra odlišnosti obsahu proteinů může ovlivnit výsledky měření. [7]

## 2.3 Účinky zmrazení a rozmrazení chrupavky na její mechanické vlastnosti

2.3

---

**SZARKO, Matthew, Ken MULDREW a John EA BERTRAM.** Freeze-thaw treatment effects on the dynamic mechanical properties of articular cartilage. [8]

Studie se zabývá výzkumem uchovávání kloubních chrupavek kryokonzervací a změnou jejich mechanických vlastností po zmrazení a následovném rozmrazení.

### Experiment

Pro testování se zvolilo několik různých teplot zmrazení. Na 24 hodin se vzorek zmrazil na 4 °C, -20 °C, -80 °C anebo se během dvou minut ochladil tekutým dusíkem na teplotu -196 °C a následně uchoval při teplotě -80 °C. Před testováním byly zkumavky prudce ohřáty na 22 °C. Pro vzorek ochlazený na 4 °C byla tato teplota dosažena po 1 minutě, u vzorku zmrazeném na -20 °C po 3 minutách a u vzorku zmrazeném na -80 °C po 5 minutách.

### Vzorek

Vzorky v tomto článku jsou odebírány z mediální tibiální kondyly 18–20 měsíců starých hovězích kolen. Extrakce probíhala do 6 hodin od porážky. Průměr vzorku je 8 mm a délka přibližně 10 mm. Přehřívání a dehydrataci chrupavky při odebírání vzorku bylo zamezeno postříkem PBS (Phosphate Buffer Salin). Každý pin (vzorek) byl následně ochlazen na 4 °C v ampuli s 5 ml PBS. Takto uložený byl maximálně 48 hodin. Hodnoty tření těchto vzorků jsou na závěr měření porovnány s hodnotami tření nezmražených vzorků.

### Výsledek

Průměr hodnot komplexní tuhosti se ve všech kontrolních skupinách příliš nelišil. Nezměnila se také hystereze u všech měřených vzorků, kromě krátce zmrazeného tekutým dusíkem a následně uchovaného při -80 °C. Ten vykazoval zvýšený fázový posun přibližně o 30 % ve srovnání s nezmraženými vzorky. Prokázalo se, že tento způsob skladování není vhodný z důvodu možného poškození chrupavky.

## 2.4 Měření koeficientu tření hovězí chrupavky na tribometru

**SHI, Liu, Vassilios I. SIKAVITSAS a Alberto STRIOLO.** Experimental Friction Coefficients for Bovine Cartilage Measured with a Pin-on-Disk Tribometer: Testing Configuration and Lubricant Effects. [4]

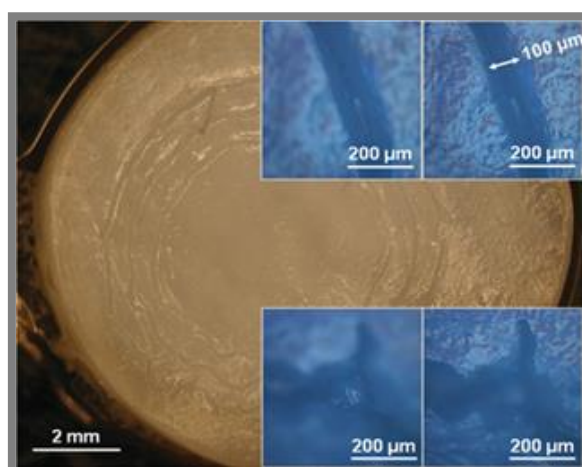
Tento článek se zabývá výzkumem tření dospělé hovězí kolenní kloubní chrupavky. Experiment probíhá na tribometru v konfiguraci pin-on-disc. Dále článek uvádí důkazy o vztazích mezi tlakem intersticiální tekutiny a mazání chrupavky. Na rozdíl od jiných prací tato vyčísľuje součinitel tření na mechanicky poškozené chrupavce. Výsledky pak porovnává s nepoškozenou chrupavkou.

### Experiment

Experiment je prováděn na tribometru v rámci konfigurace alumina-on-pin versus cartilage-on-disc (tzn. kontakt hliníkového pinu a chrupavky na disku). Součinitel tření byl měřen při konstantní normálové síle 2 N (tomu odpovídá tlak přibližně 0,63 MPa), konstantní kluzné rychlosti 1 mm·s<sup>-1</sup> a 20 otočení disku. Jedno měření trvá 377 s.

### Vzorek

Do 3 dnů od porážky jsou 15–30 měsíců stará hovězí kolena doručena do laboratoře. Do pitvy jsou kolena uchovávána při teplotě 4 °C. Vzorek ve tvaru válce je odebírán z laterálního a mediálního stehenního kondylu pomocí skalpelu a vrtáku o vnitřním průměru 10 mm a výšce 3 mm. Ten je dále upravován na konstantní tloušťku 1,3 mm. Uchovává se v roztoku PBS (pH 7,4) při teplotě –20 °C po dobu ne delší než 2 měsíce. V několika odborných člancích, včetně Caligaris and Ateshian [13], bylo prokázáno, že se při této teplotě mechanické vlastnosti chrupavky nemění. Zmrazená chrupavka byla 12 hodin před použitím skladována při 4 °C. K simulaci různých stádií poškození bylo využito různých počtů kruhových řezů. Vzorek s jedním kruhovým řezem se nazývá typ I, se dvěma typ II a se třemi typ III. Před experimentem byla chrupavka přilepena na hliníkový disk kyanoakrylátovým lepidlem.

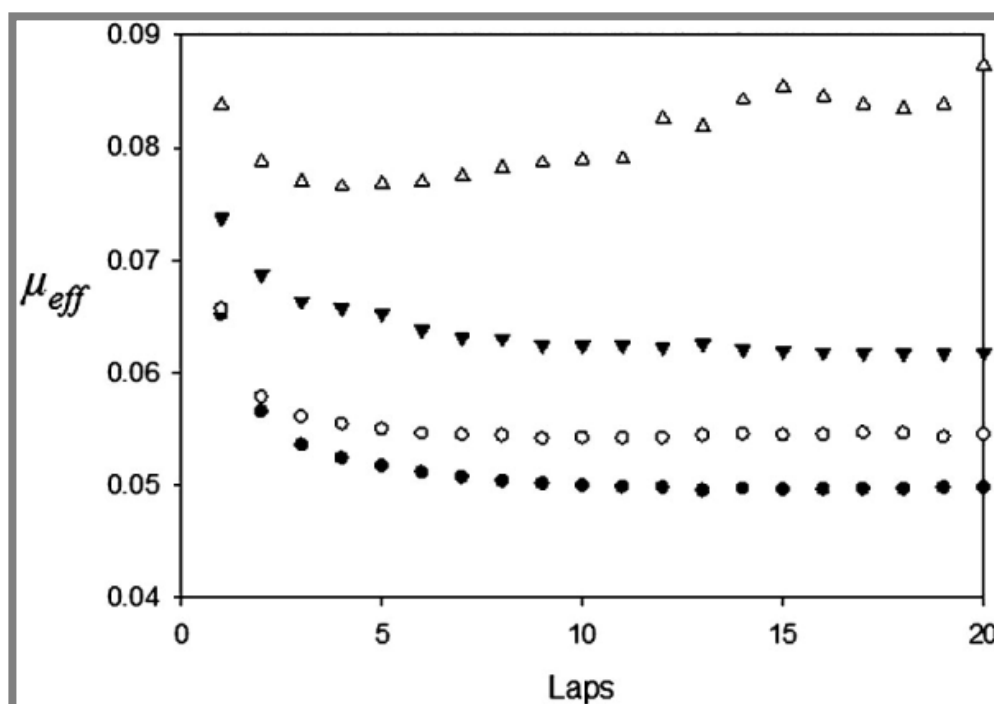


Obr. 2-2 Snímek poškozené chrupavky typ III



### Výsledek

U nepoškozené chrupavky se součinitel tření  $\mu_{eff}$  s časem snižoval ze svého maxima  $\mu_{eff} = 0,065$  až do stabilní polohy součinitele tření  $\mu_{eq} = 0,05$ . Tření se ustálilo v polovině testu, tedy po 10 otočení disku. Poškozené chrupavky typu I a typu II měly podobný průběh časově závislého součinitele tření jako křivka nepoškozené chrupavky. Počáteční tření u chrupavky typu I bylo  $\mu_{effI} = 0,066$  a ustálilo se při tření  $\mu_{eqI} = 0,055$ , u typu II bylo maximální tření  $\mu_{effII} = 0,074$ , které se ustálilo při  $\mu_{eqII} = 0,062$ . Charakteristika průběhu tření poškozené chrupavky typu III byla na začátku měření klesající ze součinitele tření  $\mu_{effIII} = 0,085$  k hodnotě 0,077. Po přibližně 75 sekundách (4 otočení) křivka začala růst. Na konci měření byl součinitel tření  $\mu_{eqIII} = 0,088$ .



**Obr. 2-3** Graf závislosti součinitele tření na počtu otočení disku. Plný kruh (●) je pro nepoškozenou chrupavku. Prázdný kruh (○) značí poškozenou chrupavku typ I. Plný trojúhelník (▼) je pro poškozenou chrupavku typu II a prázdný trojúhelník (Δ) pro typ III.

**CALIGARIS, M., C.E. CANAL, C.S. AHMAD, T.R. GARDNER a G.A. ATESHIAN.** Investigation of the frictional response of osteoarthritic human tibiofemoral joints and the potential beneficial tribological effect of healthy synovial fluid. [9]

Tato studie zkoumá, zdali přirozený růst osteoartrózy ovlivňuje negativním způsobem součinitel tření v lidských kloubech a jestli zdravá synoviální tekutina může zmírnit tření u nemocných kloubů.

### Vzorek

Vzorky jsou odebírány z kloubů lidského kolena z tkáňové banky, kde byly skladovány při  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  maximálně po dobu 1 měsíce. Jednotlivé vzorky se liší

různými stupni poškození osteoartrózou. Synoviální tekutina byla extrahována z dospělých hovězích kloubů a uskladněna při teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Průměr vzorku byl 4 mm.

### Experiment

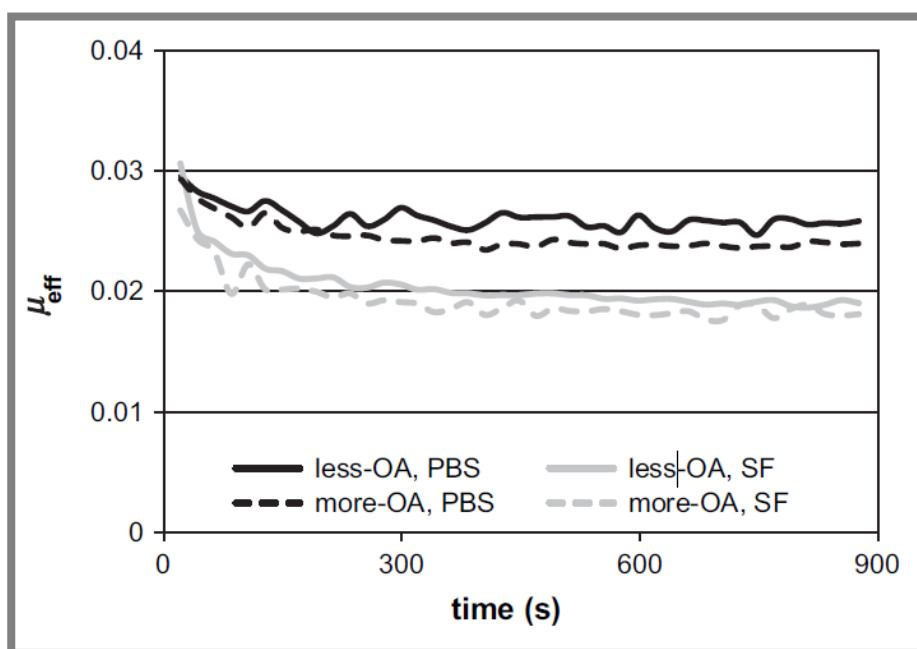
Experiment číslo 1 je nastaven v konfiguraci chrupavka na chrupavku (Pin-on-Pin), konkrétně femorální kondyl na tibiální plató. Trvá 900 sekund s konstantním zatížením 6,27 N, rychlostí  $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vzorek je ponořen v roztoku PBS. Pomocí folie citlivé na tlak byl naměřen kontaktní tlak přibližně 0,2 MPa. Po dvaceti minutách na zotavení vzorku následoval další test se stejnými podmínkami, ovšem PBS bylo nahrazeno synoviální tekutinou.

Experiment číslo 2 je nastaven na konfiguraci chrupavka na skleněný disk (Pin-on-Disc). Test trvá 3600 s při konstantním normálovém zatížení 6,27 N (přibližně 0,5 MPa), rychlostí  $1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Měření na tribometru poté probíhalo stejně jako u experimentu číslo 1.

### Výsledek

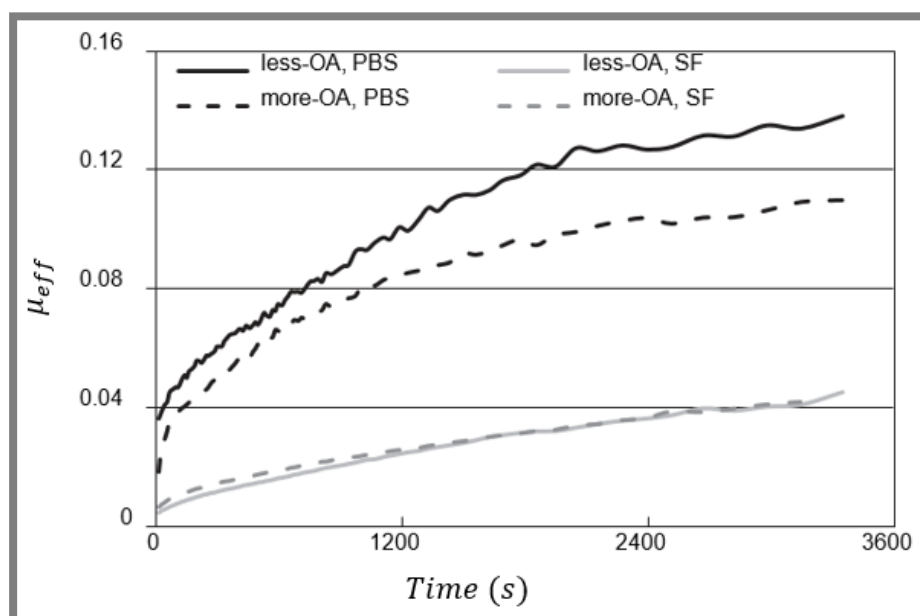
Vzorky jsou rozděleny do několika skupin. První skupinou jsou méně poškozené chrupavky osteoartrózou (less-OA) a druhou více poškozené chrupavky osteoartrózou (more-OA) a další rozdělení je podle typu maziva. Jedním z nich je PBS a druhým je synoviální tekutina (SF).

Graf na obr. 2-4 znázorňuje závislost součinitele tření na čase během prvního experimentu. Na výsledcích měření můžeme pozorovat, že součinitel tření závisí na velikosti poškození chrupavky osteoartrózou. Dalším velmi ovlivňujícím faktorem je mazivo. Vzorek v lázni PBS se ustálil na hodnotě tření  $\mu_{\text{effPBS}} = 0,025$ , což je přibližně o 35 % více než vzorek ponořený v synoviální tekutině ( $\mu_{\text{effSF}} = 0,018$ ).



Obr. 2-4 Graf závislosti součinitele tření a času v konfiguraci Pin-on-Pin

Graf na obr. 2-5 znázorňuje závislost součinitele tření na čase během druhého experimentu. Zde se opět projevila závislost koeficientu tření na poškození chrupavky. Hodnoty u vzorku s menším opotřebením chrupavky a v PBS (less-OA, PBS) se projevily jako nejhorší. Křivka stoupala z hodnoty  $\mu_{\text{effPBS}} = 0,04$  až k hodnotě tření  $\mu_{\text{eqPBS}} = 0,14$ . Druhý vzorek s větším poškozením a mazaný roztokem PBS (more-OA, PBS) měl přibližně stejnou charakteristiku křivky jako v předchozím případě, ovšem jeho hodnoty tření začínaly na  $\mu_{\text{effPBS}} = 0,02$  a končily na  $\mu_{\text{eqPBS}} = 0,11$ . Oba vzorky (jak s poškozenou, tak i nepoškozenou chrupavkou) namočené v lázni synoviální tekutiny měly téměř stejný průběh. Jejich hodnoty součinitele tření začínaly na  $\mu_{\text{effSF}} = 0,01$  a končily na hodnotě asi  $\mu_{\text{eqSF}} = 0,04$ .



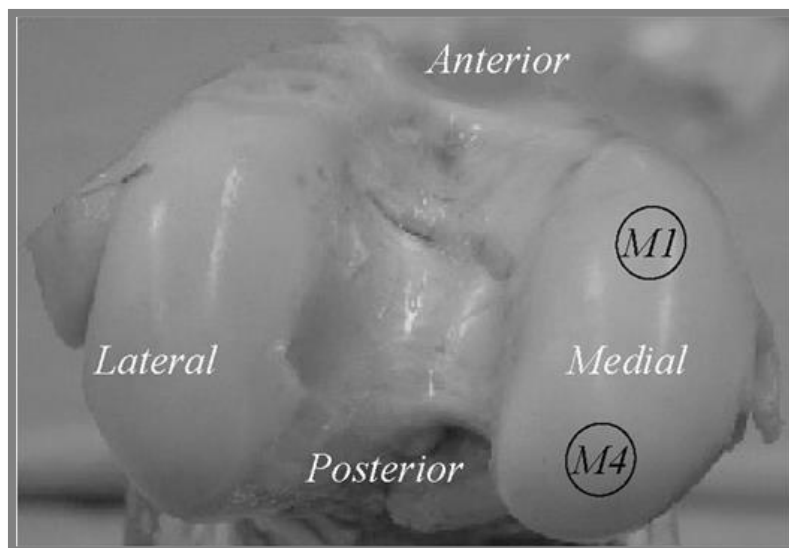
Obr. 2-5 Graf závislosti součinitele tření na čase v konfiguraci PoP

**CHAN, S.M.T., C.P. NEU, K. KOMVOPOULOS a A.H. REDDI.** The role of lubricant entrapment at biological interfaces: Reduction of friction and adhesion in articular cartilage. [10]

Tření je v tomto článku zkoumáno ze dvou oblastí hovězího kolenního kloubu s vyšším nebo nižším kontaktním tlakem. Součinitel tření je měřen na tribometru při proměnlivých normálových silách a ekvilibračních časech.

### Vzorek

Vzorek je získáván z tibiofemorálních kloubů 1–3 měsíců starých telat. Do 6 hodin od porážky jsou klouby převezeny do laboratoře a zde jsou extrahovány vzorky o velikosti průměru 5 mm. Vzorky jsou odebírány z anteriorního (předního) a posteriorního (zadního) mediálního kondylu (obr. 2-6).



**Obr. 2-6** Místa odebíraných vzorků z předního mediálního kondylu M1 (medial anterior) a zadního mediálního kondylu M4 (medial posterior).

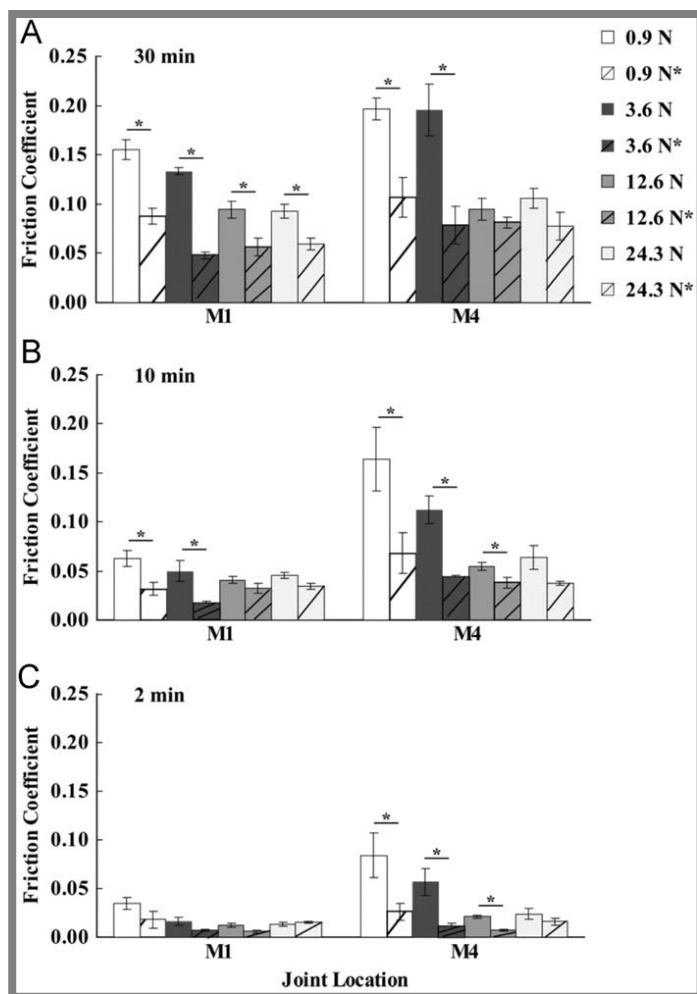
Vzorky M1 a M4 se liší velikostí tlaku v daném místě při pohybu kolenního kloubu. Anteriorní mediální kondyl je oblastí s větším zatížením a posteriorní mediální kondyl s menším zatížením. Jsou uchovávány v kultivačním mediu (DMEM)/F12 (Dulbecco's modified Eagle's medium) při teplotě 37 °C a po dobu maximálně 24 hodin.

### Experiment

Analýza tření probíhá na tribometru s konfigurací pin-on-disc. Vzorek chrupavky byl přilepen etylkyanoakrylátem na akrylátový válec, disk je ze skla. Kontakt je mazaný roztokem PBS. Před testováním se chrupavka nechá ve stavu staticky zatíženém danou silou po dobu 2, 10 nebo 30 minut (tzv. ekvilibrační čas). Pin byl zatěžován různou normálovou silou a to od 0,9 N do 24,3 N. Tyto hodnoty odpovídají kontaktnímu tlaku podle Hertzovy teorie od 0,32 MPa do 0,96 MPa. Rychlost ve všech testech je 0,5 mm·s<sup>-1</sup>. Interval měření je 0,1 s po dobu 60 s.

### Výsledek

Okamžité doplnění tekutiny na povrch chrupavky po statickém zatížení měl za následek dramatický pokles součinitele tření. Dočasný nezatížený stav měl nejvýznamnější vliv při nižším zatížení a zároveň při ekvilibračním času 10 a 30 minut. Vzorek M4 při zatížení 0,9 N a 3,6 N vykazoval větší citlivost tření na mazné kapalině na kontaktní ploše. Vzorek M1 byl pro nejdelší ekvilibrační čas (30 minut) citlivější na odstranění předpětí v celém rozsahu měřených normálových sil. Graf A v obr. 2-7 ukazuje, že u vzorku M1 pokaždé významně pokleslo tření při opětovném navrácení PBS na kontaktní plochu. Zatímco vzorek M4 vykazoval výrazné snížení součinitele tření po navrácení PBS na kontaktní plochu jen u malých zatížení (0,9 N a 3,6 N). V grafu B na obr. 2-7 poklesl součinitel tření vzorku M1 po krátkém odtížení jen u normálových sil 0,9 N a 3,6 N v porovnání s kontinuálním zatížením. U vzorku M4 byla naměřena podobná charakteristika, avšak pro síly od 0,9 N do 12,6 N. V grafu C na obr. 2-7 se součinitel tření vzorku M1 příliš neměnil, u vzorku M4 klesal při zatížení 0,9 N až 12,6 N.



**Obr. 2-7** Součinitel tření vzorků M1 a M4. Údaje s hvězdičkou značí chrupavku, která byla před měřením krátce odtížena, zatímco údaje bez hvězdičky ukazují kontinuálně zatížené chrupavky. Horizontální úsečka s hvězdičkou odpovídá statisticky odlišným vzorkům chrupavky pod daným zatížením.

**KIENLE, Sandra, Kathrin BOETTCHER, Lorenz WIEGLEB, Joanna URBAN, Rainer BURBKART, Oliver LIELEG a Thorsten HUGEL.** Comparison of friction and wear of articular cartilage on different length scales. [11]

V této práci bylo zkoumáno, jak se změny součinitelů tření změnou maziva a opotřebení kloubní chrupavky. Porovnávaly zde vodní roztoky o různých koncentracích chloridu sodného a synoviální kapalinu. Bylo zjištěno, že druh maziva mění třecí chování a odolnost opotřebení.

### **Vzorek**

Vzorky chrupavek jsou odebírány z jehňat (1–3 měsíce starých) nebo starších ovcí. Klouby se dováží z jatek, v den porážky jsou klouby zmrazeny. Před měřením jsou přes noc pomalu rozmrazeny v lednici. Z kloubů se extrahují válcovité vzorky o průměru od 5 do 10 mm, které se ponoří do maziva a jsou opět zmrazeny. V den měření se piny rozmrazí a na 1 hodinu namočí do maziva.

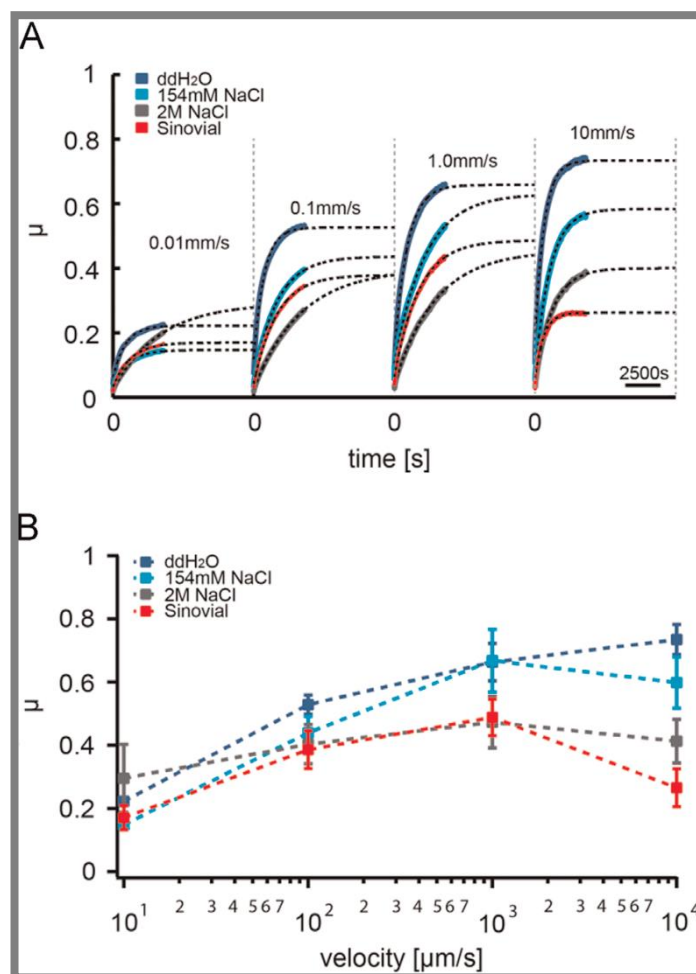
### **Experiment**

Měření probíhá na tribometru za různých podmínek. Mění se mazivo, ve kterém jsou vzorky uloženy, a rychlost. Experiment se zaměřuje na 4 konkrétní druhy maziv, redestilovaná voda (ddH<sub>2</sub>O), 0,154M roztok NaCl, 2M roztok NaCl a synoviální tekutina. Měření se provádí s konstantní rychlostí (od 0,01 mm·s<sup>-1</sup> do 10 mm·s<sup>-1</sup>) nebo proměnlivou (od 10 μm·s<sup>-1</sup> do 10 mm·s<sup>-1</sup>). Kontaktní dvojice je tvořená skleněnou koulí a pinem z chrupavky. Kontaktní tlak nabyl hodnoty 0,1 MPa. Doba trvání jednoho měření je 2500 s.

### **Výsledek**

Graf A na obr. 2-8 ukazuje závislost koeficientu tření na čase při 4 různých konstantních rychlostech pro 4 různé vzorky mazané odlišnými roztoky. Při konstantní rychlosti od 0,1 mm·s<sup>-1</sup> do 10 mm·s<sup>-1</sup> se jako nejhorší mazivo ukázalo ddH<sub>2</sub>O. Při konstantní rychlosti 0,01 mm·s<sup>-1</sup> se jako mazivo s nejmenším třením ukázal 0,154M NaCl, následovala synoviální tekutina, dále ddH<sub>2</sub>O a největší součinitel tření byl naměřen u vzorku mazaném 2M NaCl. U rychlostí větších než 0,1 mm·s<sup>-1</sup> se součinitel zvyšoval se zmenšující se koncentrací soli v mazivu.

Graf B na obr. 2-8 ukazuje závislost součinitele tření na rychlosti. Pro mazivo ddH<sub>2</sub>O součinitel tření neustále rostl. Hodnota tření při zahájení měření byla 0,21 a postupem času vzrostla na hodnotu 0,74. Pro mazné kapaliny (0,154M roztok NaCl, 2M roztok NaCl a synoviální tekutina) byla charakteristika křivky do rychlosti 1 mm·s<sup>-1</sup> rostoucí. Poté byl trend křivek klesající. Pro mazivo 0,154M roztok NaCl hodnota začínala na 0,17, u rychlosti 1 mm·s<sup>-1</sup> byla hodnota již 0,67 a pak klesla na hodnotu 0,58. Hodnota tření 2M roztoku NaCl byla na počátku měření 0,30, při rychlosti 1 mm·s<sup>-1</sup> vystoupal součinitel na hodnotu 0,45 a na konci měření klesl k 0,40. Součinitel tření synoviální tekutiny začínal na hodnotě 0,19, rostl k 0,45 a poté klesl na nejnižší hodnotu ze všech maziv, a to 0,22.



**Obr. 2-8** Časová a rychlostní závislost tření kloubní chrupavky na mazivu ddH<sub>2</sub>O (tmavě modrá), 154mM NaCl (světle modrá), 2M NaCl (šedá), synoviální tekutina (červená). Čárkovaná čára u grafu A značí vypočtený průběh tření. Graf B ukazuje tření jednotlivých vzorků závislé na proměnlivé rychlosti. Svislá čára znamená odchylku měření



---

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

---

### 3.1 Analýza problému

Jak již bylo popsáno v teoretické části, tření kloubní chrupavky závisí na mnoha faktorech. Mezi nejdůležitější faktory patří zejména kontaktní materiál, normálová síla, kinematické podmínky, typ maziva. Tato práce se z důvodu mnoha kombinací ovlivňujících měření zaměřuje pouze na výzkum součinitele tření chrupavky v kontaktu na kovový disk. Kov je nejčastějším používaným materiálem pro výrobu náhrad.

V článku [8], který se zabýval změnou mechanických vlastností po zmrazení a následném rozmrazení vzorku, bylo zjištěno, že uchovávání vzorků ochlazených na teploty od 4 °C do -80 °C se mechanické vlastnosti chrupavky nemění. Jediným způsobem uchovávání vzorku, který nevyhovoval, byl vzorek krátce hluboce zmrazený v tekutém dusíku a pak uložen do mrazničky s teplotou -80 °C.

Článek [4] zkoumal vliv poškození chrupavky na součinitel tření. Výsledky tření poškozených a nepoškozených chrupavek jsou porovnány ve výsledném grafu. S mírou poškození vzorků roste i jejich součinitel tření.

Účinek synoviální tekutiny na součinitel tření více či méně poškozené chrupavky OA byl zkoumán v článku [9]. Bylo zjištěno, že synoviální tekutina proti roztoku PBS zlepšuje součinitel tření, a to až o 35 %. V tomto výzkumu se poškození chrupavky na hodnotách tření příliš neprojevuje.

V článku [10] autoři hodnotili důležitost místa odběru vzorku, dobu a hodnotu statického zatížení. Z výsledného grafu bylo zjevné, že místo odběru vzorku ovlivňuje výsledek tření. Za určitých podmínek je rozdíl až dvojnásobný. Dalším výsledkem je zjištění, že s rostoucí hodnotou normálové síly součinitel tření klesá.

Experiment v článku [11] se zabývá vlivem rychlostí na součinitel tření. Měření probíhalo s různými druhy maziv a s konstantní nebo lineárně rostoucí rychlostí. Výsledkem grafu s konstantními rychlostmi je rostoucí hodnota tření se zvyšující se hodnotou rychlosti. Nejlepší součinitel tření byl naměřen pro 2M NaCl. Průběh hodnot tření byl u všech maziv do rychlosti 1 mm·s<sup>-1</sup> stoupající. V intervalu od 1 mm·s<sup>-1</sup> do 10 mm·s<sup>-1</sup> byl klesající téměř u všech maziv. Nejlepší součinitel tření tentokrát vyšel pro synoviální tekutinu.

---

### 3.2 Cíle bakalářské práce

Cílem práce je experimentální studium tření kloubní chrupavky. Pomocí experimentálního zařízení bude popsán vliv kinematických podmínek a zatížení na součinitel tření v kontaktu kloubní chrupavky a kovového disku. Pro splnění uvedeného cíle je třeba splnit několik dílčích cílů.

#### Dílčí cíle:

- Návrh metodiky přípravy a uchovávání vzorků chrupavek.
- Konstrukce přípravku pro upnutí vzorku chrupavky do zařízení MTM.
- Volba kinematických a zátěžných podmínek.
- Experimentální analýza vlivu kinematických podmínek a zatížení.
- Vyhodnocení naměřených dat



## 4 MATERIÁL A METODY

---

**4**

### 4.1 Mini-Traction Machine

---

4.1

Mini-Traction Machine (dále MTM) je zařízení pro experimentální výzkum součinitele tření. Výrobce je britská společnost PCS Instrument. Při výzkumu je použita konfigurace Pin-on-disc. [12]



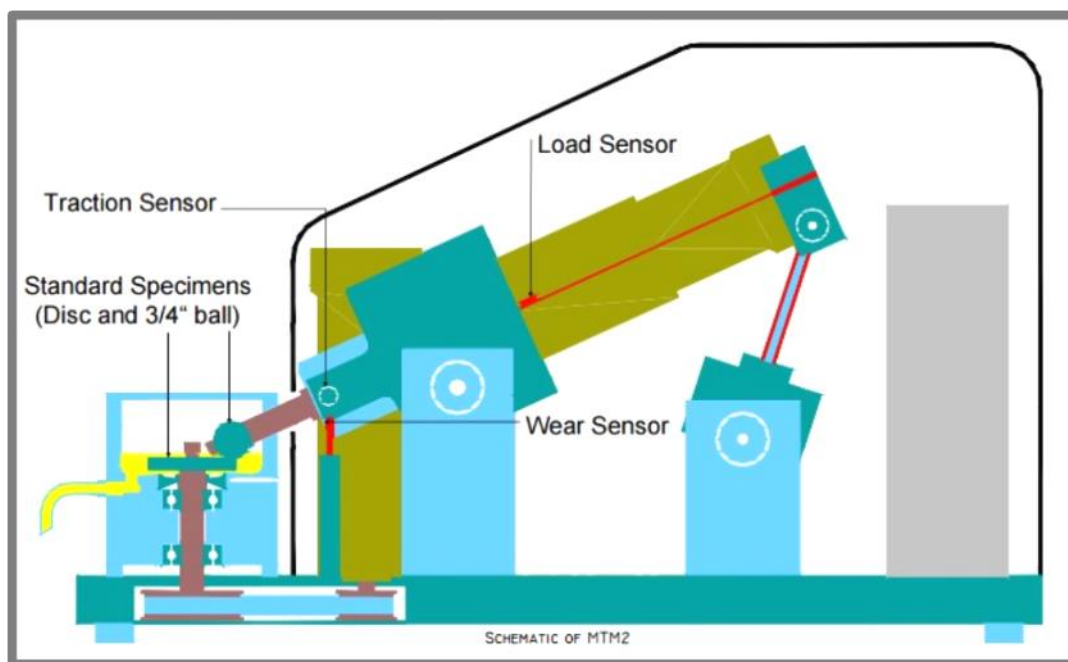
Obr. 4-1 Mini Traction Machine

#### 4.1.1 Princip zařízení

---

4.1.1

Na svislé hřídeli je maticí připevněn otáčející se disk, na který působí vzorek chrupavky. Kontaktní dvojice je uzavřena do kovové nádoby, ve které je umístěno teplotní čidlo na měření teploty mazací kapaliny. Do nádoby se navíc vkládá vložka, která zaplňuje rezervoár a snižuje tím jeho objem a množství maziva pro testování. Z důvodu konstantní teploty mazací kapaliny je celá kovová nádoba zakryta. Na šikmém ramenu je upevněn adaptér s již vloženým vzorkem, který je přitlačován přesně danou normálovou silou. Na této hřídeli je rovněž umístěn senzor měřící třecí sílu i senzor kontrolující normálovou sílu. Velikost normálové síly, rychlost otáčení disku a teplota maziva jsou plně regulovatelné. Hodnoty velikosti zatížení se mohou pohybovat od 0 do 75 N, rychlost od  $-4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a teplota od  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . [12]



Obr. 4-2 Řez zařízením MTM

## 4.2 Příprava vzorku

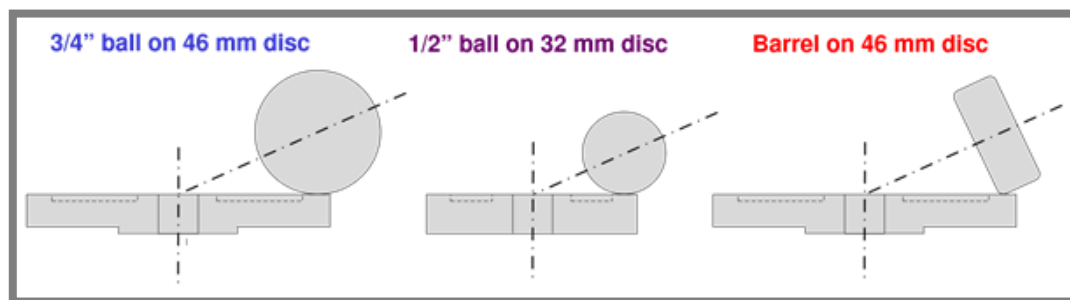
Pro extrakci chrupavky byly na výběr dvě možnosti, hovězí nebo vepřová chrupavka. Vzhledem k dostupnosti byla zvolena vepřová, konkrétně chrupavka kyčelního kloubu kvůli rovnoměrnosti zakřivení. Případná nerovnoměrnost by mohla ovlivňovat výsledky měření. Vepřový kyčelní kloub je do několika hodin od porážky převezen z místních jatek do laboratoře v chladícím boxu. Vzorky se odebírají pomocí dutého vrtáku o vnitřním průměru 5,6 mm, délka vzorků se pohybuje kolem 10 mm. Po přípravě jsou vzorky uloženy v roztoku PBS do mrazničky při teplotě  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . PBS je solný tlumivý roztok o pH 7,2–7,4, který zajišťuje konstantní hodnotu pH.

## 4.3 Vývoj adaptéru na upnutí vzorku v MTM

Pro upnutí vzorku o průměru 5,6 mm neexistuje vhodný adaptér. Proto bylo potřeba vyvinout vlastní adaptér, který by vyhovoval požadavkům.

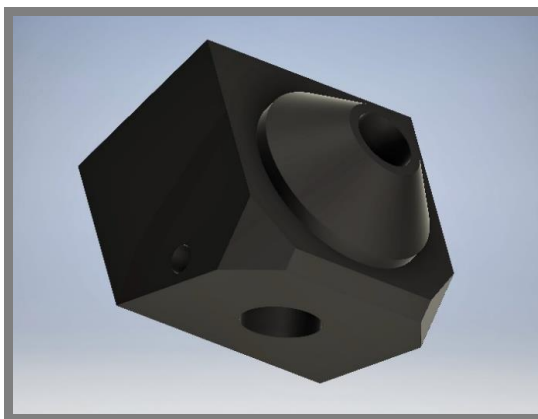
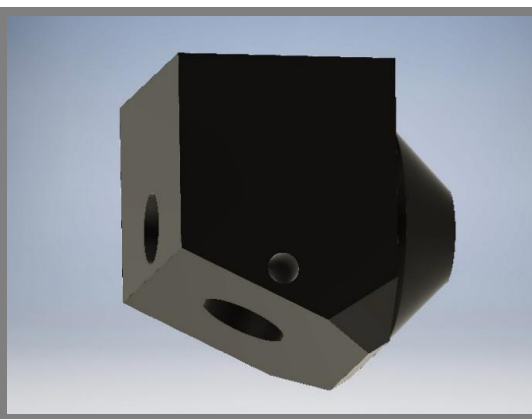
### Požadavky:

- Dostatečný průměr otvoru pro pin
- Velikost omezená prostorem vymezeným kovovou nádobou a ramenem
- Úhel natočení otvoru pro vzorek, aby po sklopení ramene byla jeho osa rovnoběžná s osou disku
- Hloubka otvoru pro pin
- Zamezení pohybu pinu při experimentech
- Materiál adaptéru

**Obr. 4-3** Konfigurace Ball-on-Disc

Velikost a hloubka otvoru byla postupně upravována do požadovaného tvaru. Úhel natočení otvoru pinu byl vypočítán pomocí goniometrických funkcí z velikosti kuličky a disku.

Zamezení pohybu pinu bylo vyřešeno pomocí stavěcího šroubu. První možnou volbou materiálu byla ocel. Z důvodu časové i technické náročnosti obrábění tak malé součásti byl zvolen tisk z plastu ABS na 3D tiskárně Prusa i3.

**Obr. 4-4** Adaptér na upnutí vzorku**Obr. 4-5** Adaptér na upnutí vzorku – jiný pohled

#### 4.4 Přehled provedených experimentů

Pro každé měření byl stanoven postup a podmínky, za kterých bude měření probíhat. Bylo třeba zvolit velikost zatížení, rychlost otáčení disku, teplotu maziva i dobu měření. Pro všechny experimenty bylo rozhodnuto, že teplota maziva bude 36,5 °C. Tato hodnota byla zvolena proto, že napodobuje teplotní podmínky lidského těla.

Výzkum byl rozdělen do několika experimentů. Experiment číslo 1 (E1) zkoumá vliv způsobu skladování na mechanické vlastnosti chrupavky, experiment číslo 2 (E2) opakovatelnost hodnot součinitele tření jednoho vzorku, experiment číslo 3 (E3) opakovatelnost tření různých vzorků, experiment číslo 4 (E4) vliv různých normálových sil a experiment číslo 5 (E5) vliv různých kinematických podmínek.

Tab. 4-1 Přehled provedených experimentů

Experiment	Čas	Zatížení	Rychlost
E1	250 s	5 N	10 mm·s <sup>-1</sup>
E2	600 s	5 N	10 mm·s <sup>-1</sup>
E3	600 s	5 N	10 mm·s <sup>-1</sup>
E4	600 s	5 N	1–50 mm·s <sup>-1</sup>
E5	600 s	1–10 N	10 mm·s <sup>-1</sup>

#### 4.5 Postup měření

1. Vyndat z mrazničky ampule s pinem a hovězím sérem,
2. Zahájit vyhřívání ampulí při laboratorní teplotě,
3. Důkladně vyčistit prostor nádoby přístroje i jeho součásti, které budou v kontaktu s mazivem,
  - a. Vyčistit SDS (Sodium Dodecyl Sulfate) roztokem,
  - b. Otřít izopropylalkoholem,
4. Usadit kovový disk, vložku, adaptér s pinem,
5. Zamezit otáčení ramena stavěcím šroubkem,
6. Zaklopit nádobu víkem,
7. Vlastní experiment,
  - a. Aplikace maziva,
  - b. Vyhřát maziva na požadovanou teplotu,
  - c. Začátek měření,
8. Vyhodnocení,

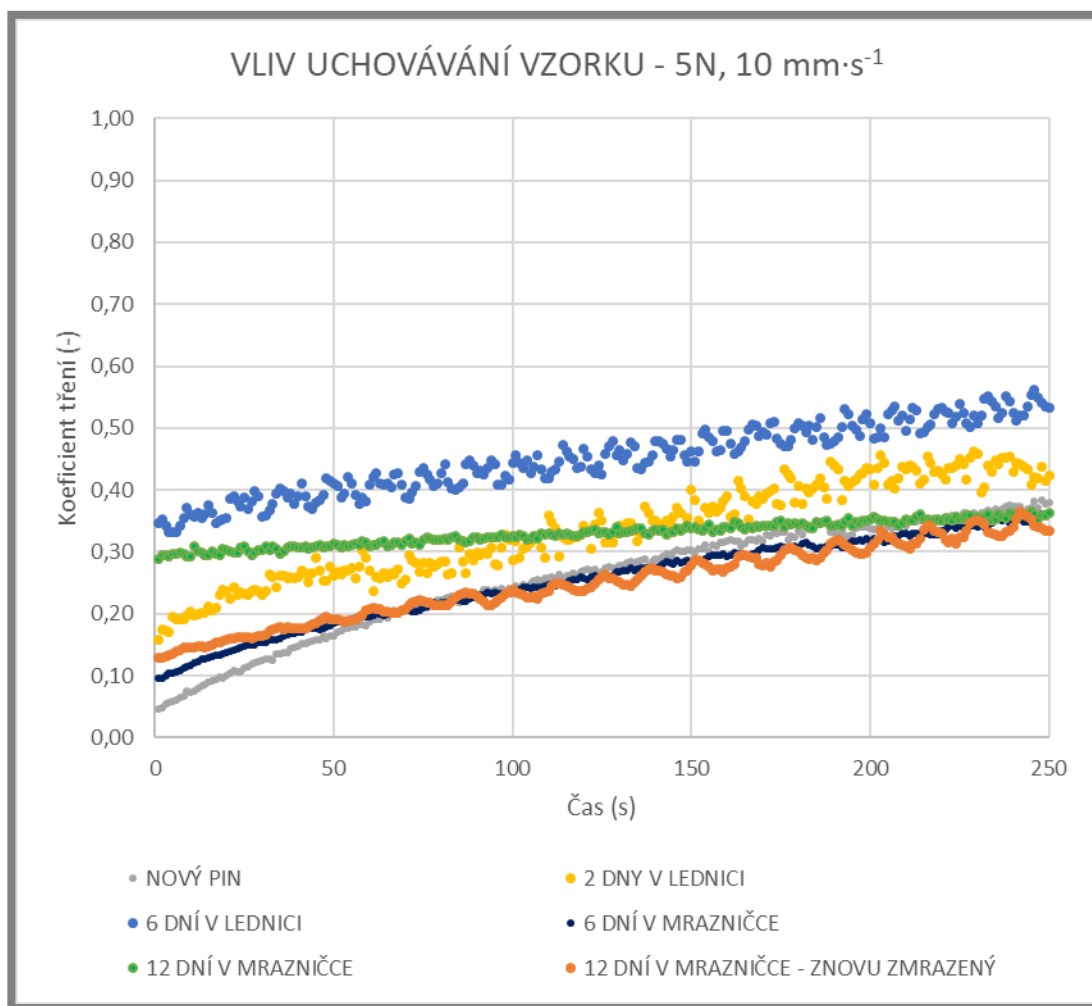
## 5 VÝSLEDKY

5

5.1

### 5.1 Vliv uchovávání vzorku (E1)

U této série experimentů byl sledován vliv doby a způsobu uchovávání vzorku na součinitel tření. Ampulky s piny byly skladovány v lednici při 4 °C a při -21 °C v mrazničce. Měření probíhalo při rychlosti 10 mm·s<sup>-1</sup>, zatěžující síle 5 N, teplotě maziva 36,5 °C a době experimentu 250 s.



**Obr. 5-1** Součinitel tření v závislosti na způsobu a době uchovávání. Normálová síla je 5 N a rychlost disku je 10 mm·s<sup>-1</sup>.

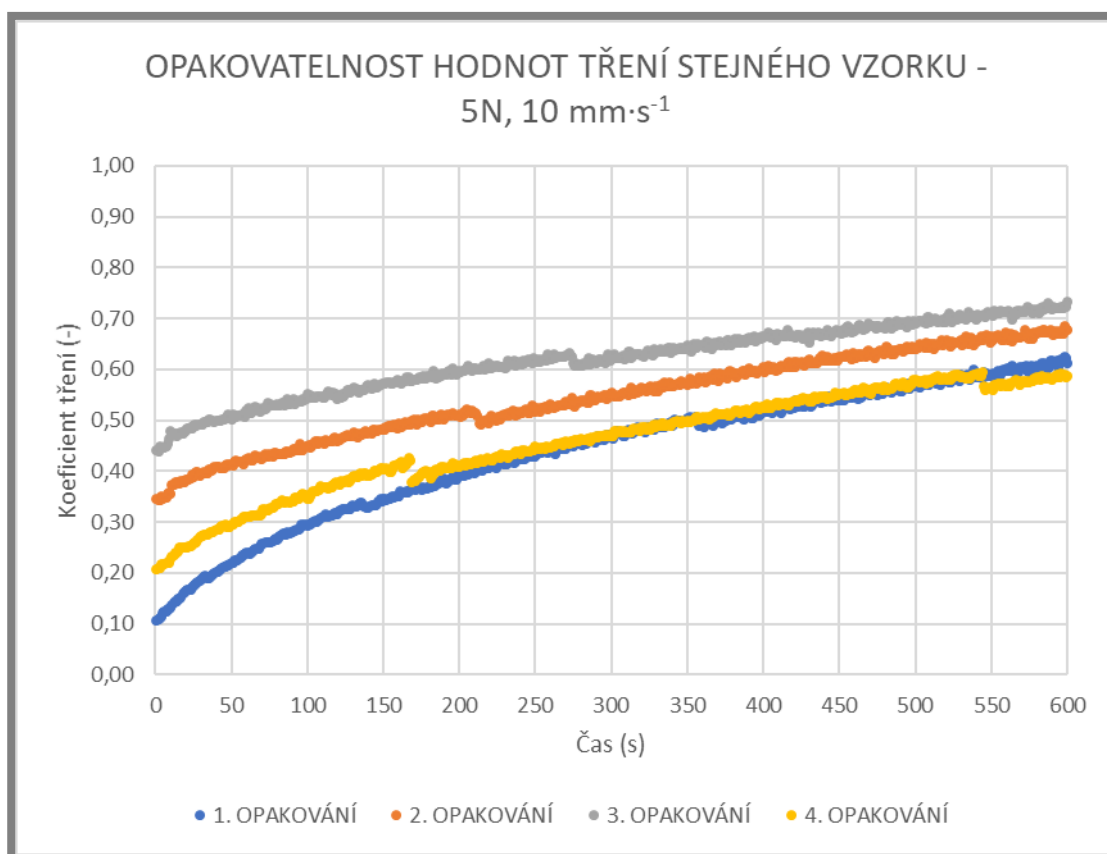
Z obr. 5-1 je patrné, že se mechanické vlastnosti chrupavky v průběhu času a při jakémkoliv způsobu uchovávání zhoršují. Hodnoty součinitele tření vzorků uchovávaných v lednici jsou o poznání horší než u vzorků skladovaných v mrazničce. Téměř stejné hodnoty součinitele tření vykazuje vzorek uchovávaný 6 dní v mrazničce a znovu zmrazený vzorek uchovávaný v mrazničce 12 dní. Vzorek uložený v mrazničce 12 dní vykazuje vyšší počáteční tření, ovšem křivka má téměř konstantní průběh a končí na podobných hodnotách jako jiné vzorky uchovávané v mrazničce. Přibližně stejný průběh křivky, ale o jednu desetinu větší tření má pin,

který byl 2 dny v lednici. Ze všech nejhorší součinitel tření má vzorek uložený na 6 dní v lednici.

Na základě tohoto měření bylo rozhodnuto o uchovávání vzorků v mrazničce po celou dobu výzkumu.

## 5.2 Opakovatelnost součinitele tření jednoho vzorku (E2)

Tento experiment se zaměřil na ověření stálosti hodnot součinitele tření vzorku po čtyři opakování. Testování probíhalo za podobných podmínek jako měření E1, tedy při rychlosti  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , zatěžující síle 5 N, teplotě maziva  $36,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a době měření 600 s. Průběhy křivek jsou zachyceny na obr. 5-2.

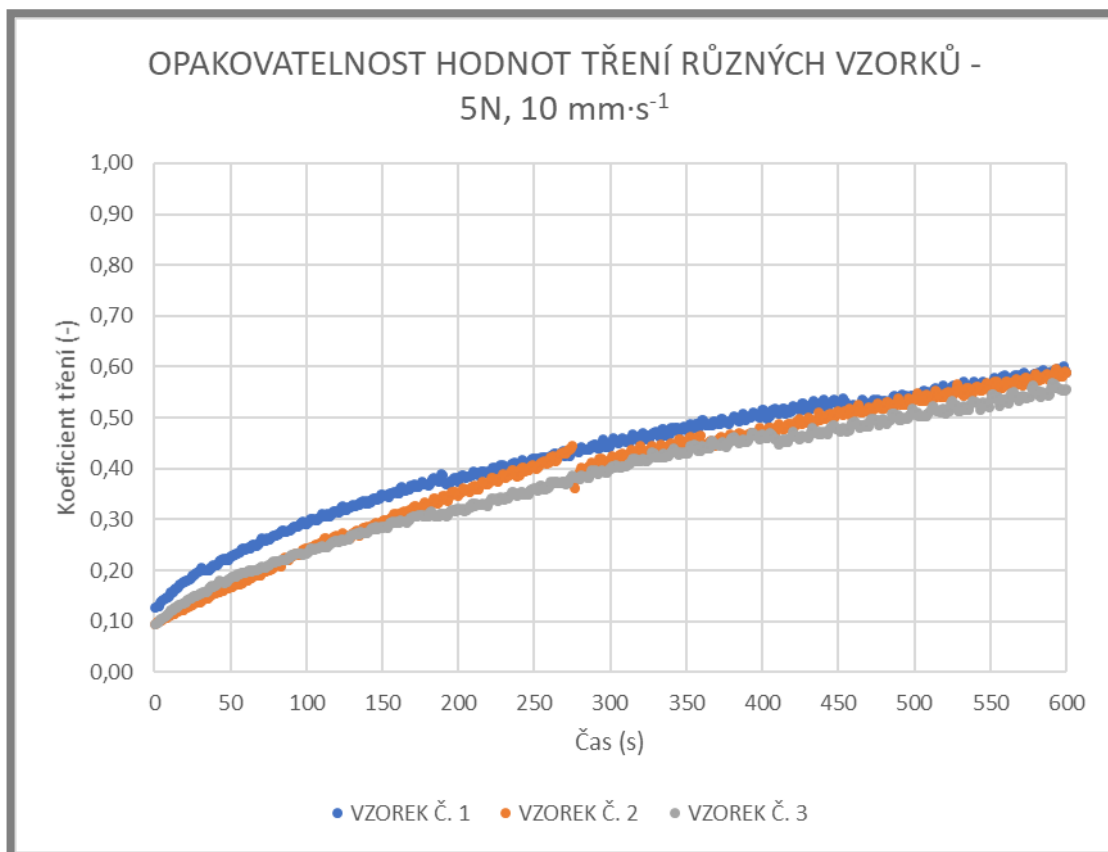


**Obr. 5-2** Opakovatelnost součinitele tření jednoho vzorku. Normálová síla je 5 N, rychlost disku  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Z obr. 5-2 vyplývá, že se od prvního měření po třetí opakování měření se hodnota postupně zvyšuje. Druhé opakování je přibližně po celé délce o dvě desetiny vyšší. Třetí opakování se liší od druhého asi o jednu desetinu. Hodnota součinitele tření čtvrtého opakování měření náhle klesla a průběh se velmi podobal prvnímu opakování.

### 5.3 Opakovatelnost součinitele tření různých vzorků (E3)

V této fázi výzkumu byly měřeny změny vlastností chrupavky různých vzorků. Experiment byl proveden při rychlosti otáčejícího disku  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , zatěžující síle 5 N, teplotě maziva  $36,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a době měření 600 s. Hodnoty jsou vyneseny v grafu na obr. 5-3.

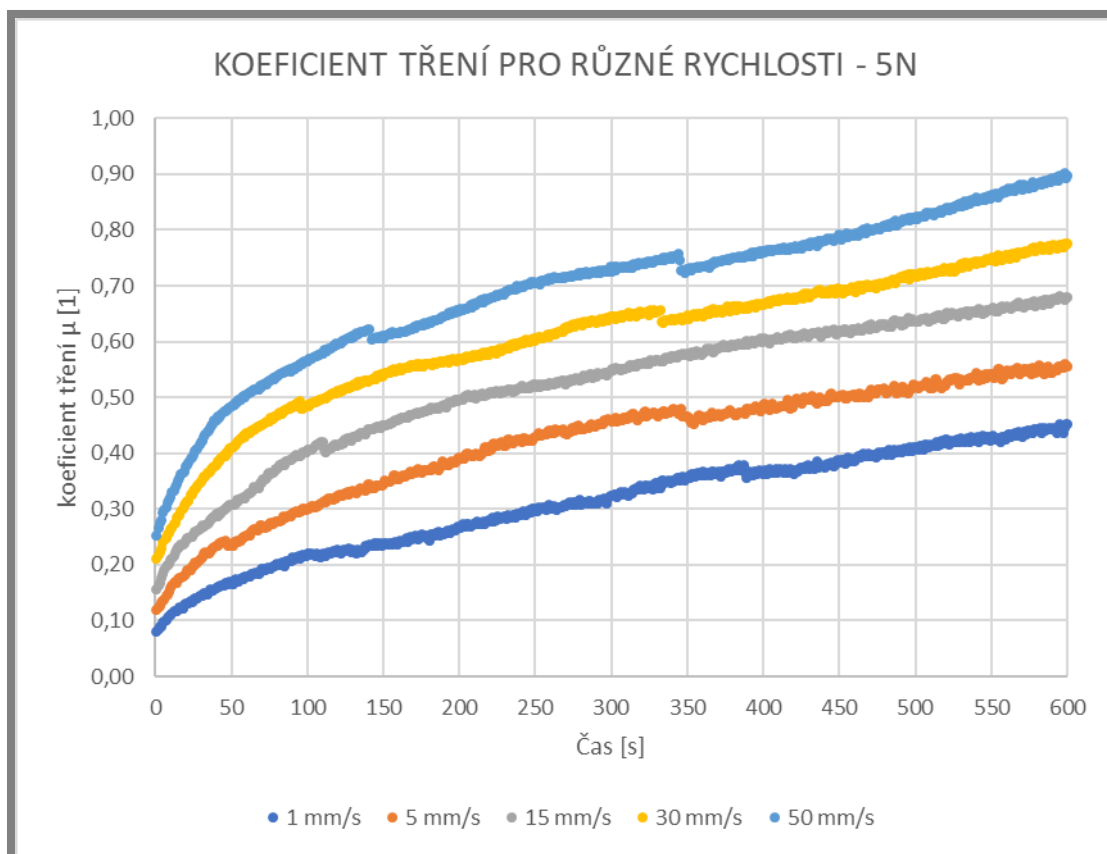


Obr. 5-3 Opakovatelnost součinitele tření jednoho vzorku. Normálová síla je 5 N, rychlost disku  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

V grafu na obrázku výše byly zaneseny 3 průběhy součinitele tření. Je zjevné, že opakovatelnost hodnot tření odlišných vzorků je velmi dobrá. Křivky pro vzorky č. 1, 2 a 3 se takřka překrývají. Všechny křivky začínají na hodnotě  $(0,11 \pm 0,01)$  a končí s třením  $(0,57 \pm 0,02)$ .

### 5.4 Vliv kinematických podmínek (E4)

V této části experimentu byly měřeny hodnoty součinitele tření za různých kinematických podmínek. Měření probíhalo se zatěžující silou 5 N, teplotě maziva 36,5 °C a době měření 600 sekund, experiment byl několikrát zopakován (příloha 1). Mezi jednotlivými rychlostmi byl vyhrazen čas 180 sekund pro regeneraci chrupavky. Regenerace probíhala při rychlosti 5 mm·s<sup>-1</sup>, zatížení 0 N a teplotě maziva 36,5 °C. Průběhy křivek jsou zachyceny na obr. 5-4.



**Obr. 5-4** Závislost součinitele tření na čase pro různé rychlosti. Hodnoty rychlostí se pohybují od 1 do 50 mm·s<sup>-1</sup>, normálová síla je 5 N.

U tohoto měření na obr. 5-4 se s rostoucí hodnotou rychlosti zvyšuje i součinitel tření. Křivka součinitele tření pro rychlost 1 mm·s<sup>-1</sup> po celou dobu měření výrazně nemění stoupání. Začíná na hodnotě tření 0,08 a v závěru měření končí na hodnotě 0,45. Součinitel tření pro rychlost 5 mm·s<sup>-1</sup> má v úvodní fázi větší narůst hodnot. Během počátečních 50 sekund vzrostlo tření z 0,12 na hodnotu 0,24. Charakteristika má s postupem času mírnější stoupání. Hodnota na konci měření je 0,55. Křivka součinitele tření pro hodnoty 15 mm·s<sup>-1</sup> roste během počátečních 100 sekund z hodnoty 0,16 na hodnotu 0,40. Pak se růst zpomaluje a na závěr má tření hodnotu 0,68. Pro rychlost 30 mm·s<sup>-1</sup> je průběh podobný jako u rychlosti 15 mm·s<sup>-1</sup>. Začíná na hodnotě 0,21, během prvních 100 sekund významně narůstá na hodnotu 0,49 a dále roste pomaleji. Konečná hodnota tření je 0,77. Měření součinitele tření pro rychlost 50 mm·s<sup>-1</sup> významně stoupl během 140 sekund z počáteční hodnoty 0,25 až na hodnotu 0,62 a dále stoupalo pozvolněji k hodnotě 0,90. Vysoký

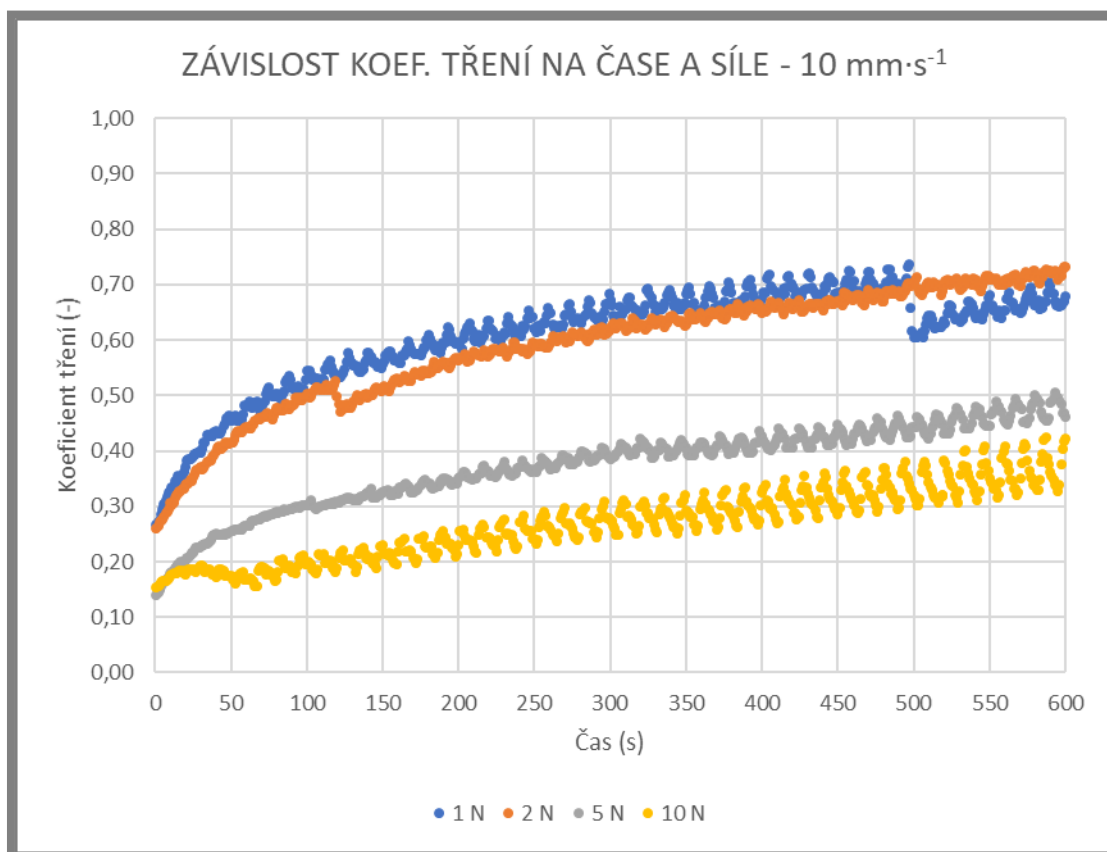


součinitel tření je zapříčiněn velkým rozdílem mezi kinematickými podmínkami reálných kloubů a tohoto měření.

### 5.5 Vliv zátěžných podmínek (E5)

5.5

Výzkum vlivu zátěžných podmínek probíhal za konstantní rychlosti  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  a době jednotlivých měření 600 s. Mezi změnou silových parametrů byl vyhrazen čas (180 s) na regeneraci chrupavky. Regenerace probíhala při rychlosti  $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , zatížení 0 N a teplotě maziva  $36,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Měření bylo několikrát opakováno (příloha 2). Charakteristiky vlivu zatěžujících sil jsou zachyceny na obr. 5-5.



**Obr. 5-5** Změna průběhu součinitele tření u různých rychlostí. Hodnoty rychlostí se pohybují od 1 do  $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , normálová síla je 5 N.

Z grafu na obr. 5-5 se největší hodnoty součinitele tření nacházejí u nejmenší normálové síly (1 N). Se stoupajícím zatížením součinitel tření klesá. Tento trend vývoje tření je dán obsahem synoviální tekutiny v extracelulární matrici. Při větším zatížení tekutina vytváří na kontaktní ploše větší kontaktní tlak, což způsobí menší hodnoty součinitele tření.

U součinitele tření pro zatížení 1 N a 2 N se charakteristika křivek velmi podobá. Během prvních 50 sekund tření narůstá z hodnoty 0,26 až na 0,45. Následně je růst pomalejší a hodnoty končí přibližně na tření 0,70. U zatížení 5 N je počáteční tření 0,13, během prvních 25 sekund se zvýší na 0,24. Po úvodní fázi roste téměř lineárně po konečnou hodnotu 0,46. U zatížení 10 N se dosáhlo nejmenšího součinitele tření. Z počáteční hodnoty 0,14 postupně pomalu rostl na hodnotu 0,36.

## 6 DISKUZE

Na všech měřených experimentech je vidět, že se s časem součinitel tření zhoršuje. To je dáno tím, že se synoviální tekutina obsažená v chrupavce postupně z extracelulární matrice uvolňuje. Méně této tekutiny v chrupavce má za následek menší kontaktní tlak a tím pádem i větší součinitel tření.

Skokové změny v průběhu měření tření, které můžeme pozorovat téměř u všech křivek, jsou zapříčiněny skokovými změnami hodnot zatěžující síly. Zařízení MTM má zejména při malých zatíženích velké odchylky (až 10 %) od požadované hodnoty. Zatěžující síla má při měření klesající tendenci. Pokud dojde k poklesu hodnot zatěžující síly pod hraniční mez, zvýší se opět na požadovanou hodnotu. Jak bylo prokázáno v článku [10] a následně ověřeno experimentem E5, se zvyšující se silou klesá součinitel tření. Proto se skoková změna projeví na součiniteli tření náhlým poklesem hodnot (Viz. příloha 3).

### Vliv uchovávání vzorků (E1)

Uchovávání vzorků kloubních chrupavek má značný vliv na výsledný koeficient tření. Výzkumem bylo zjištěno, že uchovávání v mrazáku nemá téměř žádný vliv na mechanické vlastnosti i po dobu 12 dní. Hodnoty tření uchovávaných vzorků na 2 a 6 dní v lednici byly v porovnání s čerstvým vzorkem příliš vysoké. Rozdíl mezi čerstvým pinem a pinem uchovávaným v lednici po dobu 2 dní je po celou dobu měření o 0,10 vyšší. Mezi čerstvým pinem a pinem uchovávaným 6 dní v lednici byl tento rozdíl již 0,25. Vzorek uchovávaný 12 dní v mrazničce z počátku vykazoval vyšší hodnoty tření, nakonec byla hodnota tření odlišná od nového vzorku pouze o 0,02. Ostatní křivky součinitele tření se v průběhu měření lišili minimálně (přibližně o 0,04). Podobné výsledky byly zaznamenány i v článku [8]. Jediný lišící se závěr byl u vzorku uchovávaným při 4 °C. Po ověření bylo zjištěno, že se mechanické vlastnosti chrupavky při uchovávání při této teplotě mění.

### Opakovatelnost měření (E2, E3)

Před měřením vlivů rychlostí nebo zatěžování bylo potřeba ověřit opakovatelnost výsledků součinitele tření u jednoho i více vzorků.

V grafu na obr. 5-2 proběhly opakování 1. až 3. stejného vzorku podle předpokladů, křivka stoupala se zvyšujícím se počtem opakování. Avšak křivka 4. opakování náhle klesla na hodnotu podobnou prvnímu opakování. Toto chování mohla způsobit jiná pozice vzorku v adaptéru.

Opakovatelnost hodnot tření různých vzorků se prokázala jako velmi dobrá. Hodnoty třech křivek pro jednotlivé vzorky se lišili pouze o 0,04.

### Vliv rychlostí (E4)

Při vyšších rychlostech bylo v experimentu zaznamenáno vysoké tření. Čím nižší byla rychlost, tím nižší byl i součinitel tření. Tato skutečnost je popsána v článku [11]. Nejmenší hodnoty součinitele tření vykazovalo měření při rychlosti 1 mm·s<sup>-1</sup>. S každým stupněm nárůstu rychlosti se koeficient tření zvýšil v průměru o 0,11. Pro hodnotu rychlosti 50 mm·s<sup>-1</sup> bylo konečné tření 0,89.

### **Vliv zatěžujících sil (E5)**

Značný vliv na hodnoty součinitele tření má i normálová síla. Experimentem byly ověřeny poznatky z článku [10]. Ten dokázal, že s rostoucí hodnotou normálové síly tření klesá. Je to způsobeno tím, že synoviální tekutina v mezerách extracelulární matrice vytváří s rostoucí silou větší kontaktní tlak, tím se vytlačí na povrch více synoviální tekutiny, která významně napomáhá zlepšení třecích vlastností [9].

---

## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce byla experimentální analýza procesu tření v náhradách kyčelního kloubu. Byla provedena série experimentů posuzující vliv uchovávání, rychlosti nebo zatěžující síly na mechanické vlastnosti kloubní chrupavky. V první části bakalářské práce je poskytnut podrobný náhled na složení kloubní chrupavky, na který navazuje souhrn výzkumných prací zabývajících se podobnou problematikou.

Hlavní částí práce bylo navržení metodiky přípravy (kap. 4.2) a uchovávání vzorků chrupavek (E1), konstrukce přípravku pro upnutí vzorku (kap. 4.3) a volba kinematických (E4) a zátěžných podmínek (E5).

Výsledkem práce je experimentální analýza chování jednotlivých součinitelů tření v závislosti na kinematických podmínkách a zatížení. Naměřená data jsou zpracována do grafů a porovnána s již publikovanými výsledky. Všechny zadané dílčí cíle jsou v práci splněny.

Poznatky z naměřených experimentů je možno shrnout do několika vět. Ukázalo se, že se koeficient tření s postupem času neustále zvyšuje. Dále bylo dokázáno, že s rostoucí silou se hodnota tření snižuje a s rostoucí rychlostí se naopak hodnota tření zvyšuje.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

8

- [1] ŠUHÁJKOVÁ, Pavla. Fyzioterapie po totální endoprotéze kyčelního kloubu. České Budějovice, 2011. Bakalářská práce. JIHOČESKÁ UNIVERZITA, ZDRAVOTNĚ SOCIÁLNÍ FAKULTA. Vedoucí práce PhDr. Marek Zeman, Ph.D.
- [2] TOTÁLNÍ ENDOPROTÉZY KYČELNÍCH KLOUBŮ ZLEPŠUJÍ KVALITU ŽIVOTA PACIENTŮ. Fakultní nemocnice Ostrava [online]. Ostrava, 2007 [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: <http://www.fno.cz/tiskove-zpravy/totalniendoprotezy-kycelnich-klobu-zlepsuji-kvalitu-zivota-pacientu>
- [3] LEES, Deborah a Paul PARTINGTON. Articular cartilage. *Orthopaedics and Trauma*. 2016, **30**(3), 265-272. DOI: 10.1016/j.mporth.2016.04.007. ISSN 18771327.
- [4] SHI, Liu, Vassilios I. SIKAVITSAS a Alberto STRIOLO. Experimental Friction Coefficients for Bovine Cartilage Measured with a Pin-on-Disk Tribometer: Testing Configuration and Lubricant Effects. *Annals of Biomedical Engineering*. 2011, **39**(1), 132-146. DOI: 10.1007/s10439-010-0167-3. ISSN 0090-6964
- [5] GALLO, J., M. HARTL, M. VRBKA, T. NÁVRAT a I. KŘUPKA. Co by měl vědět ortoped o biotribologii totální endoprotézy kyčelního kloubu. *Acta chirurgiae orthopaediae et traumatologiae Čechoslovaca*. 2013, **80**, 377-385
- [6] Synovial Fluid [online]. [cit. 2016-04-26]. Dostupné z: [http://cal.vet.upenn.edu/projects/saortho/chapter\\_86/86mast.htm](http://cal.vet.upenn.edu/projects/saortho/chapter_86/86mast.htm)
- [7] PARKES, M., C. MYANT, P.M. CANN a J.S.S. WONG. Synovial Fluid Lubrication: The Effect of Protein Interactions on Adsorbed and Lubricating Films. *Biotribology*. 2015, vol 1-2, s. 51-60. DOI: 10.1016/j.biotri.2015.05.001
- [8] SZARKO, Matthew, Ken MULDREW a John EA BERTRAM. Freeze-thaw treatment effects on the dynamic mechanical properties of articular cartilage. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2010, **11**(1), -. DOI: 10.1186/1471-2474-11-231. ISSN 1471-2474.
- [9] CALIGARIS, M., C.E. CANAL, C.S. AHMAD, T.R. GARDNER a G.A. ATESHIAN. Investigation of the frictional response of osteoarthritic human tibiofemoral joints and the potential beneficial tribological effect of healthy synovial fluid. *Osteoarthritis and Cartilage*. 2009, **17**(10), 1327-1332. DOI: 10.1016/j.joca.2009.03.020. ISSN 10634584.
- [10] CHAN, S.M.T., C.P. NEU, K. KOMVOPOULOS a A.H. REDDI. The role of lubricant entrapment at biological interfaces: Reduction of friction and adhesion in articular cartilage. *Journal of Biomechanics*. 2011, **44**(11), 2015-2020. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.04.015. ISSN 00219290.
- [11] KIENLE, Sandra, Kathrin BOETTCHER, Lorenz WIEGLEB, Joanna URBAN, Rainer BURGKART, Oliver LIELEG a Thorsten HUGEL. Comparison of friction and wear of articular cartilage on different length scales. *Journal of Biomechanics*. 2015, **48**(12), 3052-3058. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2015.07.027. ISSN 00219290.

- [12] *PCS Instruments* [online]. [cit. 2017-04-08].
- [13] BONNEVIE, E. D., V. J. BARO, L. WANG a David L. BURRIS. *In Situ Studies of Cartilage Microtribology: Roles of Speed and Contact Area*. DOI: 10.1007/s11249-010-9687-0. ISBN 10.1007/s11249-010-9687-0.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

**9**

---

MTM	- Mini-traction machine
PBS	- Fosfátový pufr
SDS	- Sodium dodecal sulfát
TEP	- Totální endoprotéza
SF	- Synoviální kapalina
PoP	- Pin on Pin

$\mu$  [-] - Součinitel tření

**10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

<b>Obr. 2-1</b> Struktura kloubní chrupavky [3].....	14
<b>Obr. 2-2</b> Snímek poškozené chrupavky typ III [4].....	16
<b>Obr. 2-3</b> Graf závislosti součinitele tření na počtu otočení disku [4].....	17
<b>Obr. 2-4</b> Graf závislosti součinitele tření a času v konfiguraci Pin-on-Pin [9].....	18
<b>Obr. 2-5</b> Graf závislosti součinitele tření na čase v konfiguraci PoP [9].....	19
<b>Obr. 2-6</b> Místa odebíraných vzorků z předního mediálního kondylu M1 (medial anterior) a zadního mediálního kondylu M4 (medial posterior) [10].....	20
<b>Obr. 2-7</b> Součinitel tření vzorků M1 a M4 [10].....	21
<b>Obr. 2-8</b> Časová a rychlostní závislost tření kloubní chrupavky na mazivu [11].....	23
<b>Obr. 4-1</b> Mini Traction Machine [12].....	25
<b>Obr. 4-2</b> Řez zařízením MTM [12].....	26
<b>Obr. 4-3</b> Konfigurace Ball-on-Disc [12].....	27
<b>Obr. 4-4</b> Adaptér na upnutí vzorku.....	27
<b>Obr. 4-5</b> Adaptér na upnutí vzorku – jiný pohled.....	27
<b>Obr. 5-1</b> Součinitel tření v závislosti na způsobu a době uchovávání.....	29
<b>Obr. 5-2</b> Opakovatelnost součinitele tření jednoho vzorku.....	30
<b>Obr. 5-3</b> Opakovatelnost součinitele tření jednoho vzorku.....	31
<b>Obr. 5-4</b> Závislost součinitele tření na čase pro různé rychlosti.....	32
<b>Obr. 5-5</b> Změna průběhu součinitele tření u různých rychlostí.....	33



## **11 SEZNAM TABULEK**

**11**

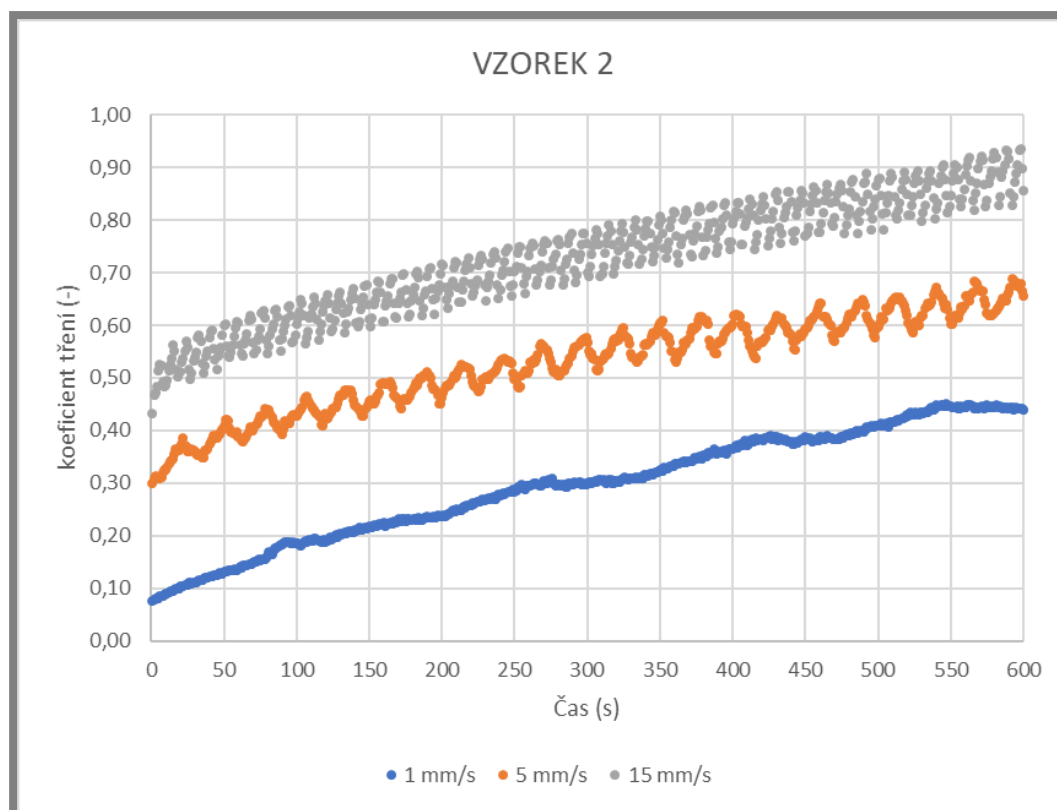
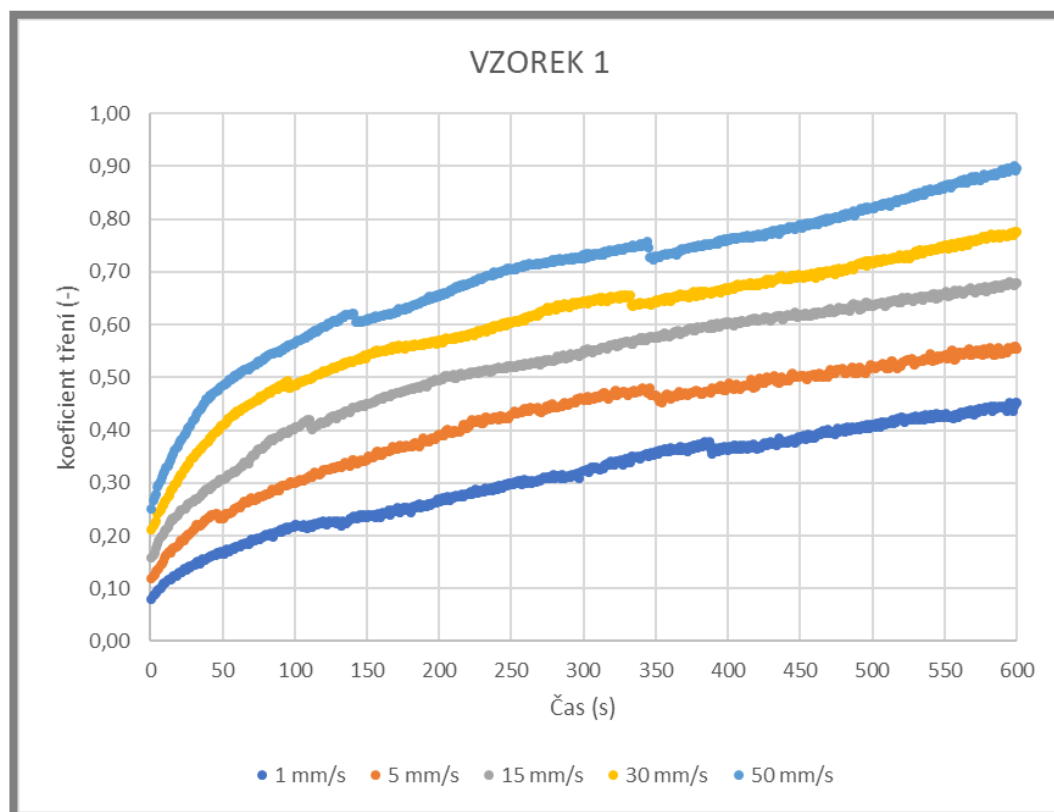
---

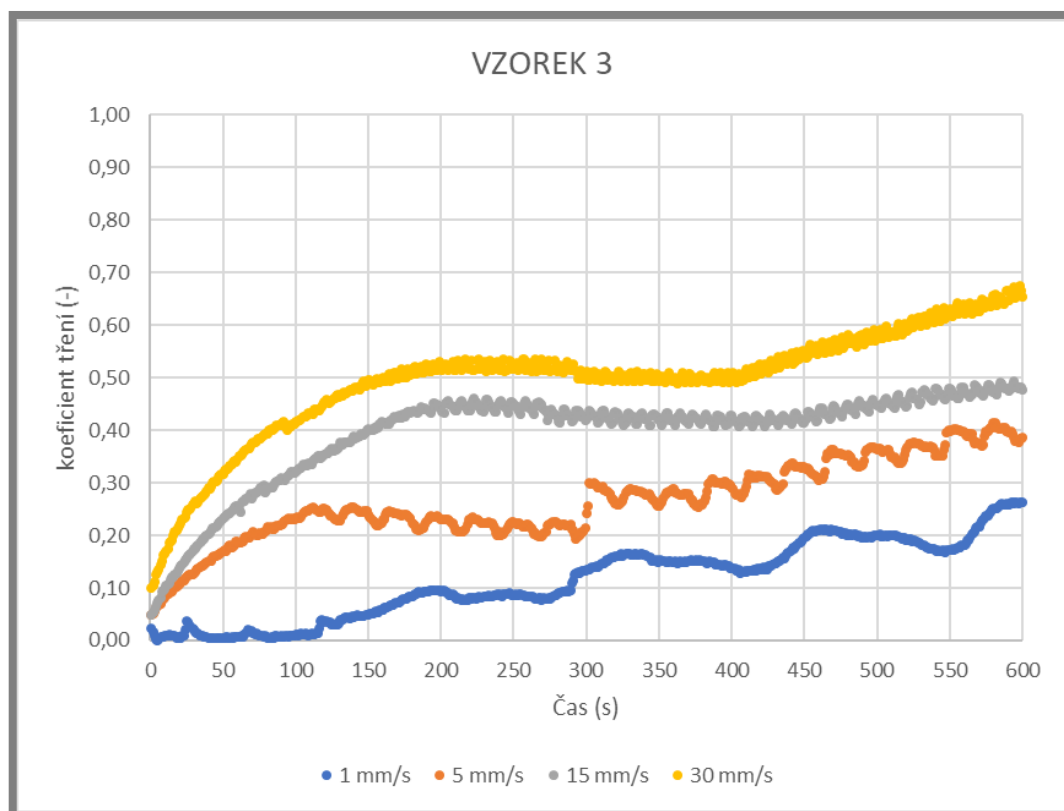
<b>Tab. 4-1</b> Přehled provedených experimentů.....	28
--	----

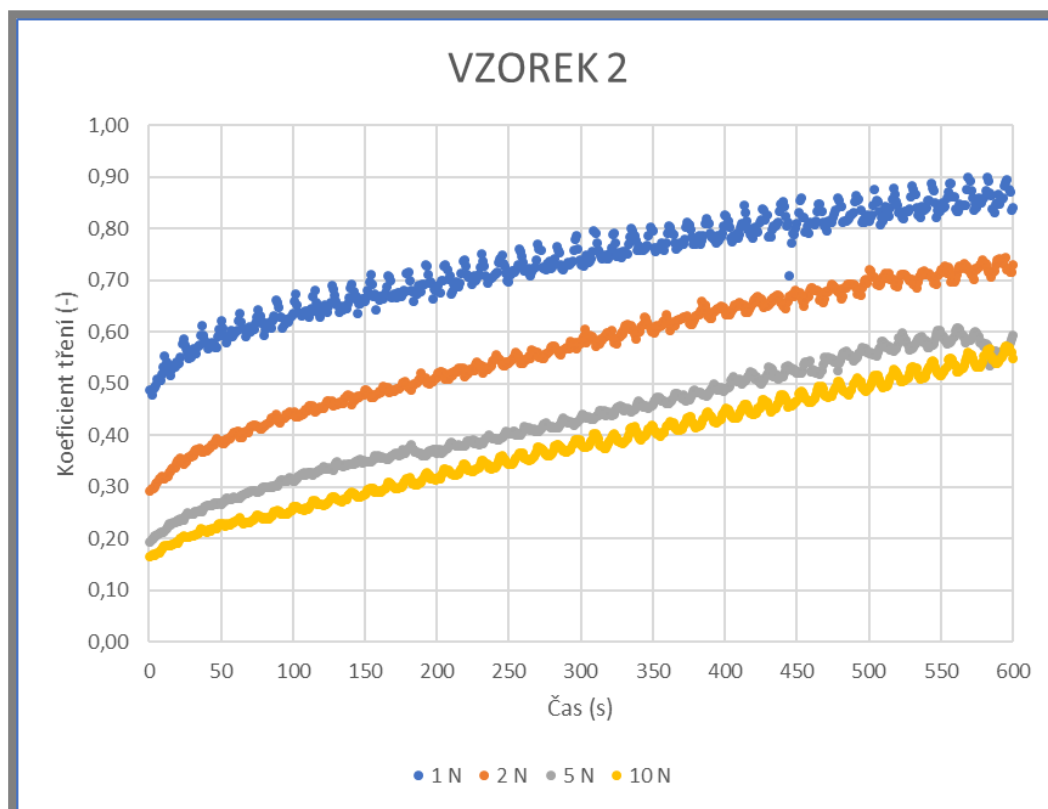
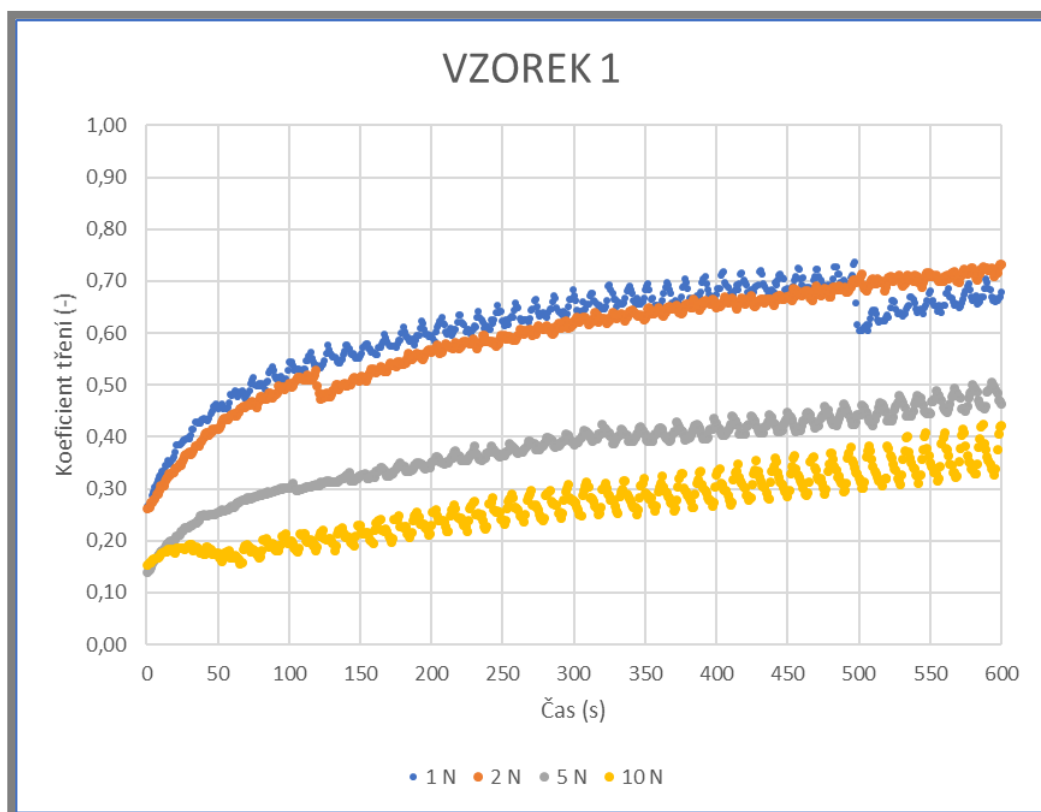
---

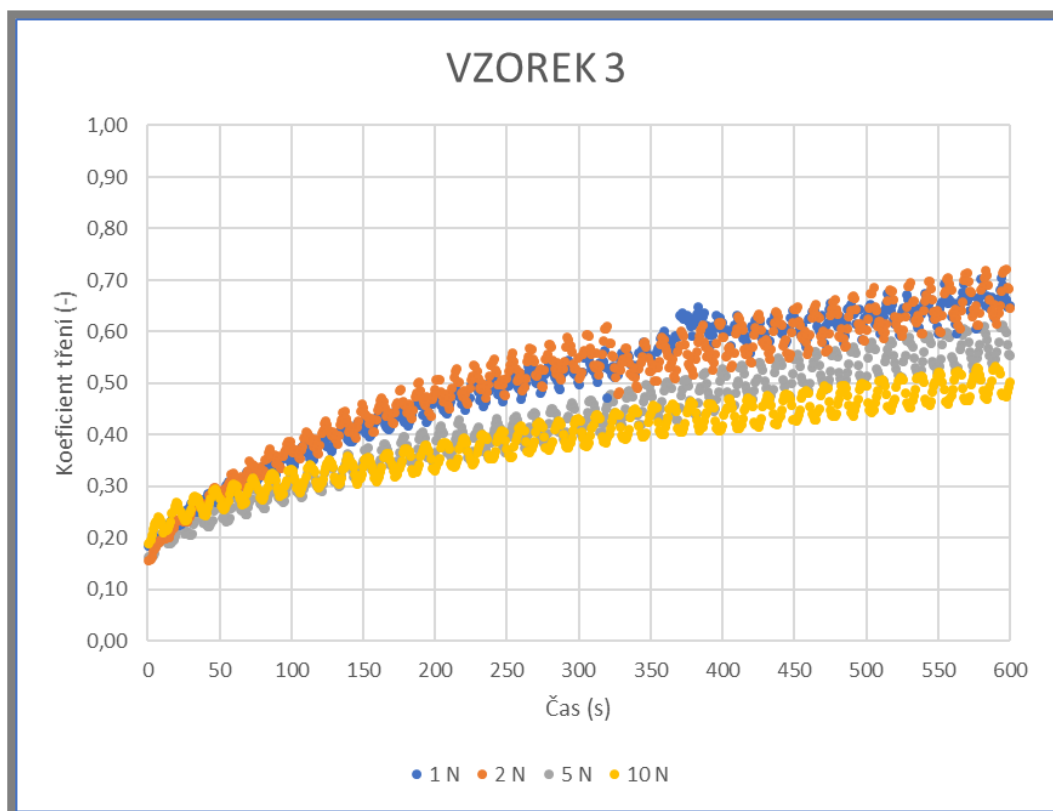
## **12 SEZNAM PŘÍLOH**

<b>Příloha 1</b>	Výsledky měření součinitele tření pro jednotlivé rychlosti
<b>Příloha 2</b>	Výsledky měření součinitele tření ovlivněné působením sil
<b>Příloha 3</b>	Vliv skoku hodnoty zatěžující síly na součinitel tření

**PŘÍLOHA 1****Vliv rychlostí na koeficient tření (E4)**



**PŘÍLOHA 2****Vliv zatěžujících sil na koeficient tření (E5)**



**PŘÍLOHA 3****Vliv skoku hodnoty zatěžující síly na koeficient tření**